Nicolae Sfetcu

MECANICA CUANTICĂ FENOMENOLOGICĂ

EDIȚIA ALB-NEGRU

MultiMedia Publishing

Mecanica cuantică fenomenologică

Nicolae Sfetcu

Publicat de MultiMedia Publishing

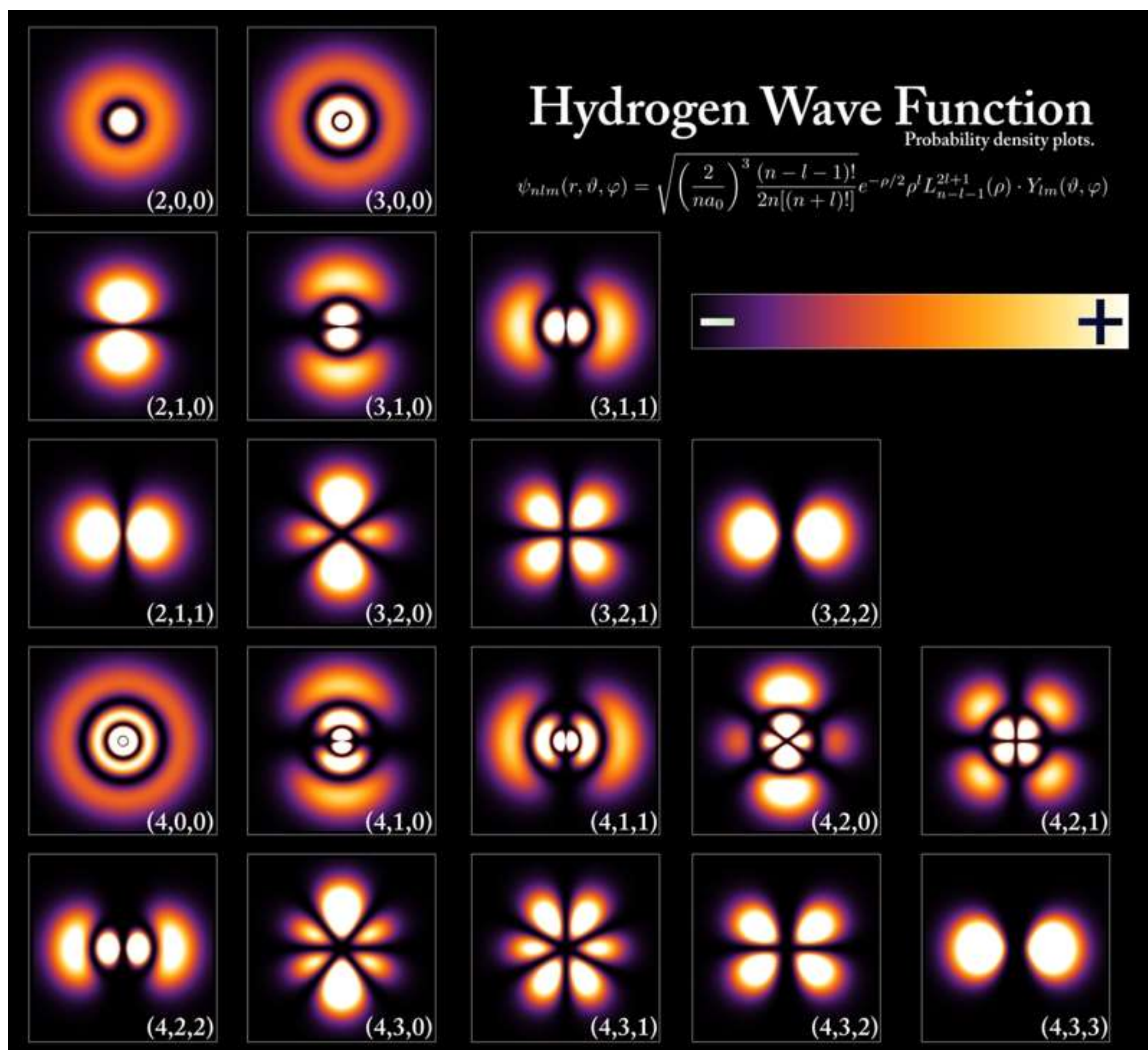
PREVIZUALIZARE

Publicat de MultiMedia Publishing, Drobeta Turnu Severin, 2019, www.setthings.com/editura

ISBN 978-606-033-119-3

Prima ediție

1 Mecanica cuantică



(Funcțiile de undă ale electronului într-un atom de hidrogen la diferite nivele de energie. Mecanica cuantică nu poate prezice locația exactă a unei particule în spațiu, ci doar probabilitatea de a fi găsită în diferite locații. Aria mai strălucitoare reprezintă o probabilitate mai mare de găsire a electronului.)

Mecanica cuantică (cunoscută și sub numele de **fizica cuantică** sau **teoria cuantică**), inclusiv teoria câmpului cuantic, este o teorie fundamentală în fizică, descriind natura la cele mai mici scale de nivele de energie ale atomilor și particulelor subatomice.

Fizica clasică (fizica existentă înainte de mecanica cuantică) este un set de teorii fundamentale care descriu natura la scară obișnuită (macroscopică). Cele mai multe teorii din fizica clasică pot fi derivate din mecanica cuantică ca o aproximare valabilă la scară mare (macroscopică). Mecanica cuantică diferă de fizica clasică prin faptul că: energia, impulsul și alte cantități ale unui sistem pot fi limitate la valori discrete (*cuantificarea*), obiectele au caracteristici atât ale particulelor, cât și ale undelor (*dualitatea undă-particulă*) și există limite ale preciziei cu care pot fi cunoscute cantitățile (*principiul incertitudinii*).

Mecanica cuantică a apărut treptat din teorii pentru a explica observațiile care nu puteau fi în concordanță cu fizica clasică, cum ar fi soluția lui Max Planck în 1900 față de problema radiațiilor negre și de corespondența dintre energie și frecvență în lucrarea lui Albert Einstein din 1905 care explică efectul fotoelectric. Teoria cuantică timpurie a fost profund re-concepută la mijlocul anilor 1920 de Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Max Born și alții. Teoria modernă este formulată în diferite formalizări matematice special dezvoltate. În una dintre ele, o funcție matematică, funcția de undă, furnizează informații despre amplitudinea probabilității poziției, momentului și a altor proprietăți fizice ale unei particule.

Aplicații importante ale teoriei cuantice includ chimia cuantică, optica cuantică, calculul cuantic, magneții superconductori, diodele emițătoare de lumină și laserul, tranzistorul și semiconductorii precum microprocesorul, imagistica medicală și de cercetare, precum imagistica prin rezonanță magnetică și microscopia electronică. Explicațiile pentru multe fenomene biologice și fizice sunt înrădăcinate în natura legăturii chimice, mai ales macro-moleculei ADN.

Descrierea teoriei

Mecanica cuantică descrie starea instantanee a unui sistem cu o funcție de undă care codifică distribuția de probabilitate a tuturor proprietăților măsurabile, sau *observabile*. Observabilele posibile pentru un sistem includ energia, poziția, impulsul, și momentul cinetic. Mecanica cuantică nu atribuie valori definite la observabile, făcând în schimb predicții despre distribuțiile lor de probabilitate. Proprietățile de undă ale materiei se explică prin interferența funcțiilor de undă.

Funcțiile de undă se pot schimba în timp. De exemplu, o particulă care se deplasează în spațiul gol poate fi descrisă de o funcție de undă care este un pachet de unde centrat în jurul unei poziții medii. Pe măsură ce trece timpul, centrul pachetului de unde se schimbă, astfel încât particula devine mult mai susceptibilă de a fi situată într-o poziție diferită. Evoluția în timp a funcțiilor de undă este descrisă de ecuația Schrödinger.

Unele funcții de undă descriu distribuțiile de probabilitate care sunt constante în timp. Multe sisteme care ar fi tratate în mod dinamic în mecanica clasică sunt descrise de astfel de funcții de undă statice. De exemplu, un electron într-un atom neexcitat este înfățișat clasic ca o particulă care înconjoară nucleul atomic, în timp ce în mecanica cuantică este descris de un nor de probabilitate static cu simetrie sferică în jurul nucleului.

Când o măsurătoare se realizează pe o observabilă a sistemului, funcția de undă se transformă într-un set de funcții de undă care sunt numite *stări proprii* ale observabilelor. Acest proces este cunoscut sub numele de *colaps* al funcției de undă. Probabilitățile relative ale colapsului în fiecare dintre posibilele stări proprii este descrisă de funcția de undă instantanee chiar înainte de colaps. Luați în considerare exemplul de mai sus al unei particule în mișcare în spațiu gol. Dacă măsurăm poziția particulei, vom obține o valoare x aleatorie. În general, este imposibil să prezicem cu certitudine valoarea x pe care o vom obține, deși este probabil că vom obține una care este aproape de centrul pachetului de unde, unde amplitudinea funcției de undă este mare. După ce măsurarea a fost realizată, funcția de undă a particulei colapsează într-una care este concentrată brusc în jurul poziției observate x.

În timpul procesului de colaps al funcției de undă, funcția de undă nu se supune ecuației Schrödinger. Ecuația Schrödinger este deterministă, în sensul că, având în vedere o funcție de undă la un moment inițial, se face o predicție clară a ceea ce va fi funcția de undă în orice moment ulterior. În timpul unei măsurători, starea proprie la care colapsează funcția de undă este probabilistă, nu deterministă. Natura probabilistică a mecanicii cuantice rezultă astfel din actul de măsurare.

Una dintre consecințele colapsului funcției de undă este că anumite perechi de observabile, cum ar fi poziția și impulsul, nu pot fi stabilite în același timp cu o precizie arbitrară. Acest efect este cunoscut sub numele de *principiul incertitudinii al lui Heisenberg*.

Istorie

Cercetarea științifică privind natura undelor luminoase a început în secolele 17 și 18, când oamenii de știință precum Robert Hooke, Christiaan Huygens și Leonhard Euler au propus o teorie ondulatorie a luminii bazată pe observații experimentale. În 1803, Thomas Young, un polimat englez, a realizat faimosul experiment cu fanta dublă pe care l-a descris mai târziu într-o lucrare intitulată *Despre natura luminii și a culorilor*. Acest experiment a jucat un rol major în acceptarea generală a teoriei undelor luminoase.

În 1838, Michael Faraday a descoperit razele catodice. Aceste studii au fost urmate de afirmația din 1859 privind problema radiației negre a corpului de către Gustav Kirchhoff, sugestia din 1877 a lui Ludwig Boltzmann că stările energetice ale unui sistem fizic pot fi discrete, și ipoteza cuantică a lui Max Planck din 1900. Ipoteza lui Planck, conform căreia energia este radiată și absorbită în ”cuante” (sau pachetele de energie) discrete se potrivește exact cu modelele observate ale radiației corpului negru.

În 1896, Wilhelm Wien a stabilit în mod empiric o lege de distribuție a radiației negre a corpului, cunoscută drept legea lui Wien în cinstea sa. Ludwig Boltzmann a ajuns în mod independent la acest rezultat prin considerații ale ecuațiilor lui Maxwell. Dar acesta a fost valabil numai la frecvențe înalte și a subestimat radiația la frecvențe joase. Mai târziu, Planck a corectat acest model folosind interpretarea statistică a termodinamicii lui Boltzmann și a propus ceea ce se numește acum Legea lui Planck, care a dus la dezvoltarea mecanicii cuantice.

Urmând soluția lui Max Planck în 1900 la problema radiațiilor negre ale corpurilor (raportată în 1859), Albert Einstein a oferit o teorie cuantică pentru a explica efectul fotoelectric (1905, raportat în 1887). În perioada 1900-1910, teoria atomică și teoria corpusculară a luminii a ajuns pentru prima dată acceptată pe scară largă ca fapt științific; aceste teorii din urmă pot fi privite ca teorii cuantice ale materiei și radiației electromagnetice, respectiv.

Printre primii care au studiat fenomenele cuantice în natură au fost Arthur Compton, C. V. Raman și Pieter Zeeman, fiecare având un efect cuantic numit după el. Robert Andrews Millikan a studiat experimental efectul fotoelectric, iar Albert Einstein a dezvoltat o teorie pentru acesta. În același timp, Ernest Rutherford a descoperit experimental modelul nuclear al atomului, pentru care Niels Bohr a dezvoltat teoria structurii atomice, lucru confirmat ulterior de experimentele lui Henry Moseley. În 1913, Peter Debye a extins teoria structurii atomice a lui Niels Bohr,

introducând orbite eliptice, un concept introdus de Arnold Sommerfeld. Această fază este cunoscută sub numele de *teoria cuantică veche*.

Conform lui Planck, fiecare element energetic (E) este proporțional cu frecvența sa (ν):

$$E = h \nu$$

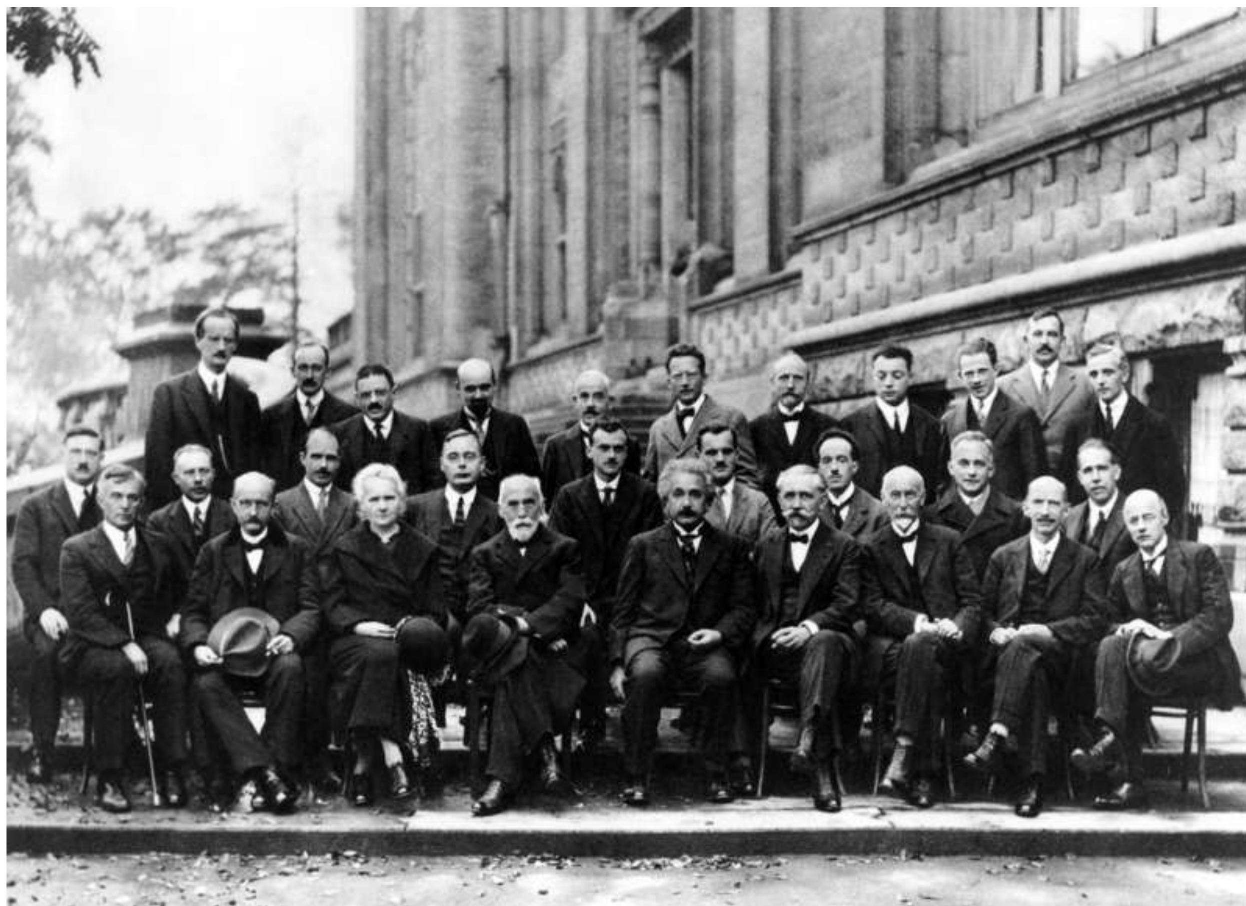
unde h este constanta lui Planck.



(Max Planck este considerat tatăl teoriei cuantice.)

Planck a insistat cu prudență că acesta este pur și simplu un aspect al proceselor de absorbție și emisie a radiațiilor și nu are nimic de-a face cu realitatea fizică a radiației în sine. De fapt, el a considerat ipoteza sa cuantică un truc matematic pentru a obține răspunsul corect, mai degrabă decât o descoperire considerabilă. Cu toate acestea, în 1905, Albert Einstein a interpretat realist ipoteza cuantică a lui Planck și a folosit-o pentru a explica efectul fotoelectric, în care lumina strălucitoare a anumitor materiale poate scoate electroni din material. A câștigat Premiul Nobel pentru Fizică din 1921 pentru această lucrare.

Einstein a dezvoltat în continuare această idee pentru a arăta că o undă electromagnetică precum lumina ar putea, de asemenea, să fie descrisă ca o particulă (mai târziu numită foton), cu o cuantă discretă de energie dependentă de frecvența acesteia.


(Conferința Solvay din 1927 de la Bruxelles.)

Bazele mecanicii cuantice au fost înființate în timpul primei jumătăți a secolului XX de Max Planck, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Louis de Broglie, Arthur Compton, Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Max Born, John von Neumann, Paul Dirac, Enrico Fermi , Wolfgang Pauli, Max von Laue, Freeman Dyson, David Hilbert, Wilhelm Wien, Satyendra Nath Bose, Arnold Sommerfeld și alții. Interpretarea de la Copenhaga a lui Niels Bohr a devenit larg acceptată.

La mijlocul anilor 1920, evoluțiile în mecanica cuantică au dus la transformarea sa în formularea standard pentru fizica atomică. În vara lui 1925, Bohr și Heisenberg au publicat rezultate care au închis vechea teorie cuantică. Datorită comportamentului lor asemănător particulelor în anumite procese și măsurători, cuantele de lumină au fost numite fotoni (1926). Din postulatul simplu al lui Einstein s-a născut o serie de dezbateri, teoretizări și testări. Astfel, a apărut întregul câmp al fizicii cuantice, ceea ce a dus la acceptarea sa mai largă la cea de-a cincea Conferință Solvay din 1927.

Sa constatat că particulele subatomice și undele electromagnetice nu sunt pur și simplu particule și unde, ci au anumite proprietăți ale fiecăreia. Acest lucru a inițiat conceptul de dualitate undă-particulă.

Prin 1930, mecanica cuantică a fost în continuare unificată și formalizată prin lucrarea lui David Hilbert, Paul Dirac și John von Neumann cu un mai mare accent pe măsurare, natura statistică a cunoașterii noastre a realității, și speculații filozofice despre „observator“ . De aici au apărut multe discipline, inclusiv chimia cuantică, electronica cuantică, optica cuantică și știința cuantică a informațiilor. Dezvoltările sale speculative moderne includ teoria corzilor și teoriile gravitației cuantice. De asemenea, aceasta oferă un cadru util pentru multe caracteristici ale tabelului periodic modern de elemente și descrie comportamentele atomilor în timpul legăturilor chimice și fluxul de electroni în semiconductorii calculatorului și, prin urmare, joacă un rol crucial în numeroasele tehnologii moderne.

Deși mecanica cuantică a fost construită pentru a descrie lumea foarte mică, este necesară și explicarea unor fenomene macroscopice, cum ar fi superconductorii și suprafluidele.

Cuvântul *cuantic* provine din latina, însemnând ”cât de mare” sau ”cât de mult”. În mecanica cuantică, se referă la o unitate discretă atribuită anumitor cantități fizice, cum ar fi energia unui atom în stare de repaus. Descoperirea că particulele sunt pachetele discrete de energie cu proprietăți asemănătoare undelor a condus la ramura fizicii care se ocupă de sistemele atomice și subatomice, numită astăzi mecanica cuantică. Ea stă la baza cadrului matematic al multor domenii ale fizicii și chimiei, inclusiv fizica materiei condensate, fizica stării solide, fizica atomică, fizica moleculară, fizica computațională, chimia computațională, chimia cuantică, fizica particulelor, chimia nucleară și fizica nucleară. Unele aspecte fundamentale ale teoriei sunt încă studiate în mod activ.

Mecanica cuantică este esențială pentru înțelegerea comportamentului sistemelor la scări de lungime atomică și mai mici. Dacă natura fizică a unui atom ar fi fost descrisă doar de mecanica clasică, electronii nu ar orbita nucleul, deoarece orbitele electronilor emit radiații (datorită mișcării circulare) și s-ar ciocni în cele din urmă cu nucleul din cauza acestei pierderii de energie. Acest cadru nu a putut explica stabilitatea atomilor. În schimb, electronii rămân pe o orbită nesigură, nedeterministă, probabilistică de tipul undă-particulă, în jurul nucleului, sfidând ipotezele tradiționale ale mecanicii clasice și ale electromagnetismului.

Mecanica cuantică a fost inițial dezvoltată pentru a oferi o explicație și o descriere mai bună a atomului, în special diferențele în spectrul luminii emise de diferiți izotopi ai aceluiași element chimic, precum și particulele subatomice. Pe scurt, modelul atomic mecanic cuantic a reușit spectaculos în regiunea în care mecanica clasică și electromagnetismul au eșuat.

În general, mecanica cuantică încorporează patru clase de fenomene pe care fizica clasică nu le poate explica:

- cuantificarea anumitor proprietăți fizice
- inseparabilitatea cuantică
- principiul incertitudinii

- dualitatea undă-particulă

...

2 Dualitatea undă-particulă


(Louis de Broglie în 1929. De Broglie a câștigat Premiul Nobel pentru Fizică pentru predicția că materia acționează ca o undă, făcută în teza sa de doctorat din 1924.)

Dualitatea undă-particulă este conceptul mecanicii cuantice în care fiecare particulă sau entitate cuantică poate fi descrisă parțial nu doar ca particulă, ci și ca undă. Exprimă

incapacitatea conceptelor clasice de "particulă" sau "undă" de a descrie pe deplin comportamentul obiectelor la scară cuantică. După cum a scris Albert Einstein:

”Se pare că trebuie să folosim uneori o teorie și, uneori, pe cealaltă, în timp ce uneori putem folosi pe oricare. Ne confruntăm cu o nouă dificultate. Avem două imagini contradictorii ale realității; separat, niciuna dintre ele nu explică pe deplin fenomenul luminii, ci doae împreună o fac.”

Prin lucrările lui Max Planck, Albert Einstein, Louis de Broglie, Arthur Compton, Niels Bohr și alții, teoria științifică actuală susține că toate particulele au și o natură de undă (și invers). Acest fenomen a fost verificat nu numai pentru particulele elementare, ci și pentru particulele componente cum ar fi atomii și chiar moleculele. Pentru particulele macroscopice, datorită lungimilor de undă extrem de scurte, proprietățile undelor de obicei nu pot fi detectate.

Deși utilizarea dualității undă-particulă a funcționat bine în fizică, sensul sau interpretarea nu a fost rezolvată în mod satisfăcător.

Bohr a considerat "paradoxul dualității" drept un fapt fundamental sau metafizic al naturii. Un anumit tip de obiect cuantic va prezenta uneori caracter de undă, alteori de particulă, în setări fizice diferite. El a văzut dualitatea ca un aspect al conceptului de complementaritate. Bohr a considerat renunțarea la relația cauză-efect sau complementaritate, a imaginii spațiu-timp, ca fiind esențială pentru mecanica cuantică.

Werner Heisenberg a examinat întrebarea în continuare. El a văzut dualitatea ca prezentă pentru toate entitățile cuantice, dar nu chiar în raportul obișnuit mecanic cuantic considerat de Bohr. El a văzut-o în ceea ce se numește a doua cuantificare, care generează un concept complet nou de câmpuri care există în spațiu-timp obișnuit, cauzalitatea fiind încă vizualizabilă. Valorile câmpului clasic (de exemplu, intensitățile câmpului electric și magnetic al lui Maxwell) sunt înlocuite de un alt tip de valoare a câmpului, așa cum se consideră în teoria câmpului cuantic. Întorcând raționamentul, mecanica cuantică obișnuită poate fi dedusă ca o consecință specializată a teoriei câmpului cuantic.

Tratamentul în mecanica cuantică modernă

Dualitatea undă-particulă este adânc încorporată în fundamentele mecanicii cuantice. În formalismul teoriei, toate informațiile despre o particulă sunt codificate în *funcția de undă,* o funcție complexă, aproximativ asemănătoare cu amplitudinea unei unde în fiecare punct din spațiu. Această funcție evoluează conform unei ecuații diferențiale (denumită generic ecuația Schrödinger). Pentru particulele cu masă, această ecuație are soluții care urmează forma ecuației de undă. Propagarea acestor unde duce la fenomene asemănătoare undelor, cum ar fi interferențele și difracția. Particulele fără masă, cum ar fi fotonii, nu au soluții ale ecuației Schrödinger, deci au o altă undă.

Comportamentul asemănător cu particulelor este cel mai evident datorită fenomenelor asociate cu măsurarea în mecanica cuantică. La măsurarea locației particulei, particula va fi forțată într-o stare mai localizată, dată de principiul incertitudinii. Când privim prin acest formalism,

măsurarea funcției de undă va "colapsa" la întâmplare, sau mai degrabă va ajunge "decoerentă", până la o funcție ascuțită de vârf la o anumită locație. Pentru particulele cu masă, probabilitatea de a detecta particula în orice loc specific este egală cu amplitudinea pătrată a funcției de undă de acolo. Măsurarea va reveni la o poziție bine definită, (sub rezerva incertitudinii), o proprietate asociată în mod tradițional cu particule. Este important de observat că o măsurătoare este doar un tip particular de interacțiune în care sunt înregistrate unele date, iar cantitatea măsurată este forțată într-o anumită stare proprie. Prin urmare, actul de măsurare nu este fundamental diferit de orice altă interacțiune.

În urma dezvoltării teoriei câmpului cuantic, ambiguitatea a dispărut. Câmpul permite soluții care urmează ecuația undelor, care sunt denumite funcții de undă. Termenul de particulă este folosit pentru a eticheta reprezentările ireductibile ale grupului Lorentz care sunt permise de câmp. O interacțiune ca într-o diagramă Feynman este acceptată ca o aproximare care poate fi calculată convenabil în cazul în care ieșirile sunt cunoscute a fi simplificări ale propagării și liniile interne sunt pentru o anumită ordine într-o extindere a interacțiunii câmpului. Din moment ce câmpul este non-local și cuantificat, fenomenele care anterior au fost considerate paradoxuri sunt explicate. În limitele dualității undă-particulă teoria câmpului cuantic oferă aceleași rezultate.

Comportarea ca o undă a materiei a fost pentru prima dată demonstrată experimental pentru electroni: un fascicul de electroni poate prezenta difracție, la fel ca un fascicul de lumină sau un val de apă. Fenomene asemănătoare unor unde similare au fost prezentate mai târziu pentru atomi și chiar molecule.

Lungimea de undă, λ, asociată cu orice obiect, este legată de impulsul său, p, prin constanta Planck, h:

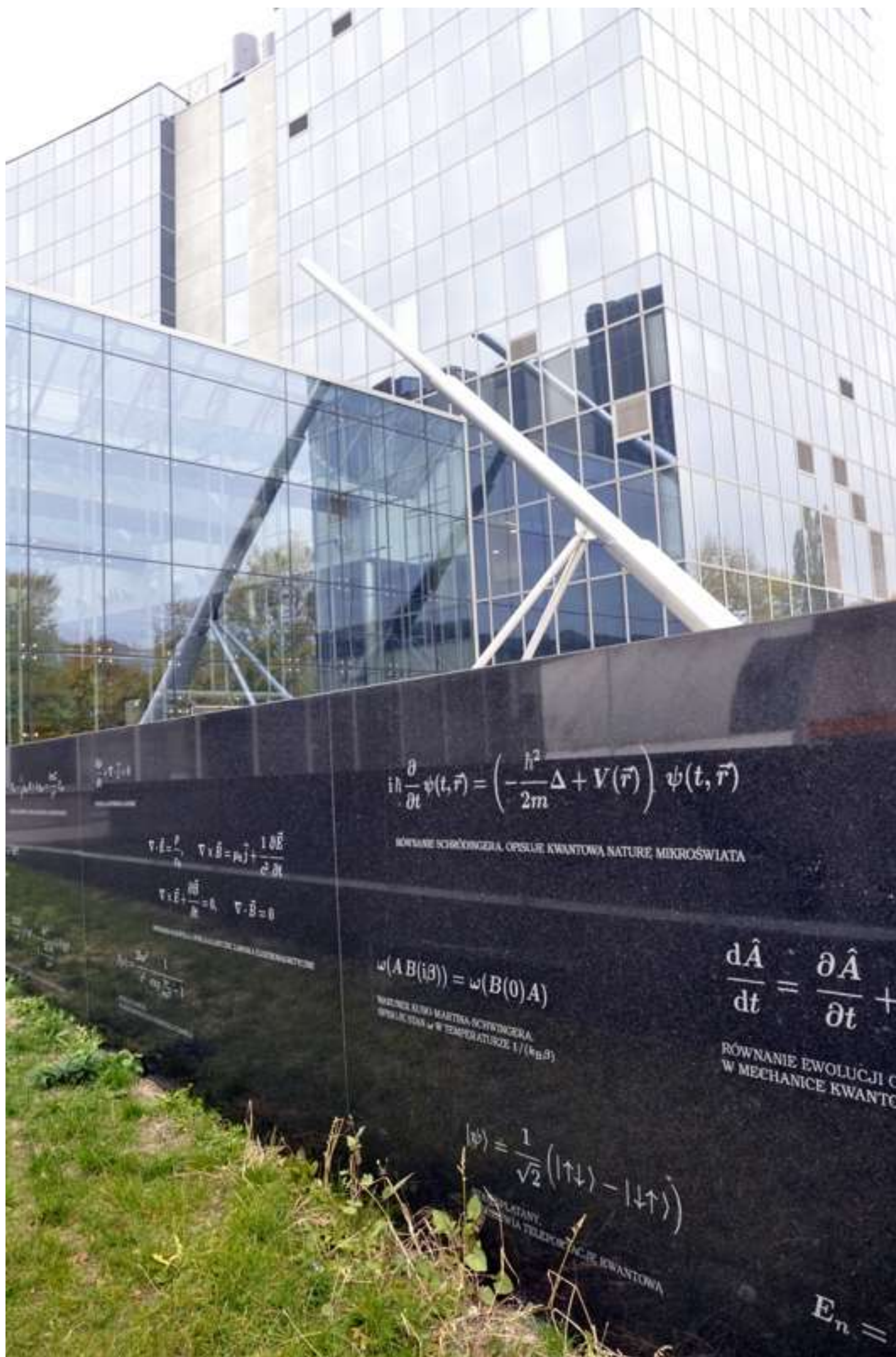
$$p = h\,\lambda.$$

Relația, numită *ipoteza de Broglie*, este valabilă pentru toate tipurile de materie: toate materiile prezintă proprietăți ale particulelor și ale undelor.

Conceptul dualității undă-particulă spune că nici conceptul clasic de "particulă", nici cel de "undă" nu poate descrie pe deplin comportamentul obiectelor la scală cuantică, fie fotoni, fie materie. Dualitatea undă-particulă este un exemplu al principiului complementarității în fizica cuantică.

...

3 Ecuația Schrödinger



(Ecuația Schrödinger ca parte a unui monument în fața Centrului de noi tehnologii al Universității din Varșovia. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Warszawa_Centrum_Nowych_Technologii_UW-6.jpg)

În mecanica cuantică, **ecuația Schrödinger** este o ecuație matematică care descrie schimbările în timp ale unui sistem fizic în care efectele cuantice, cum ar fi dualitatea undă-particulă, sunt semnificative. Ecuația este o formulă matematică pentru studierea sistemelor mecanice cuantice. Este considerată un rezultat central în studiul sistemelor cuantice, iar derivarea sa a reprezentat un reper important în dezvoltarea teoriei mecanicii cuantice. A fost numită după Erwin Schrödinger, care a derivat ecuația în 1925 și a publicat rezultatele în 1926, formând baza pentru lucrarea sa care a condus la acordarea Premiului Nobel pentru Fizică în 1933. Ecuația este un tip de ecuație diferențială cunoscută sub numele de ecuație de undă, care servește ca un model matematic al mișcării undelor.

În mecanica clasică, a doua lege a lui Newton ($F = ma$) este folosită pentru a face o predicție matematică cu privire la ce cale va avea un sistem dat după un set de condiții inițiale cunoscute. În mecanica cuantică, legea analogică a lui Newton este ecuația lui Schrödinger pentru un sistem cuantic (de obicei atomi, molecule și particule subatomice libere, legate sau localizate). Nu este o ecuație algebrică, ci, în general, o ecuație diferențială liniară parțială, care descrie evoluția în timp a funcției de undă a sistemului (denumită și "funcție de stare").

Conceptul de *funcție de undă* este un postulat fundamental al mecanicii cuantice. Folosind aceste postulate, ecuația lui Schrödinger poate fi derivată din faptul că operatorul evoluției în timp trebuie să fie unitar și trebuie, prin urmare, să fie generat de exponențialul unui operator auto-adjunct, care este hamiltonianul cuantic.

În interpretarea de la Copenhaga a mecanicii cuantice, funcția de undă este cea mai completă descriere care poate fi dată unui sistem fizic. Soluțiile pentru ecuația lui Schrödinger descriu nu numai sistemele moleculare, atomice și subatomice, ci și sistemele macroscopice, eventual chiar întregul univers. Ecuația lui Schrödinger este centrală pentru toate aplicațiile mecanicii cuantice, inclusiv teoria câmpului cuantic, care combină relativitatea specială cu mecanica cuantică. Teoriile gravitației cuantice, cum ar fi teoria corzilor, de asemenea, nu modifică ecuația lui Schrödinger.

Ecuația Schrödinger nu este singura modalitate de a studia sistemele mecanice cuantice și de a face predicții, deoarece există și alte formulări ale mecanicii cuantice, cum ar fi mecanica matriceală, introduse de Werner Heisenberg și formularea integrală a căii, dezvoltată în principal de Richard Feynman. Paul Dirac a integrat mecanica matriceală și ecuația Schrödinger într-o singură formulare.

...

4 Pachete de unde

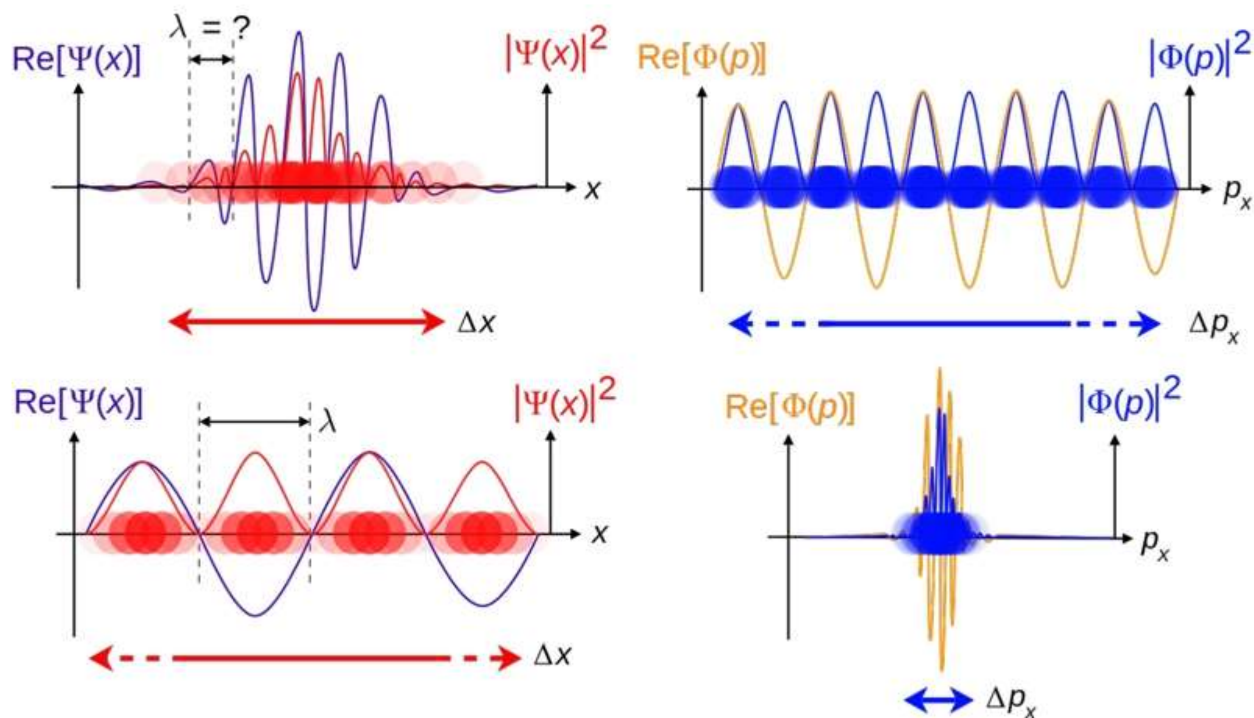
În fizică, un **pachet de unde** (sau un **tren de unde**) este o scurtă „explozie” sau „anvelopă” a acțiunii undelor localizate care se deplasează ca o unitate. Un pachet de unde poate fi analizat sau poate fi sintetizat dintr-un set infinit de unde sinusoidale componente ale diferitelor numere de undă, cu faze și amplitudini astfel încât ele să interfereze constructiv numai pe o mică regiune a spațiului și distructiv în altă parte. Fiecare funcție de undă componentă și, prin urmare,

pachetul de unde, sunt soluții ale unei ecuații de undă. În funcție de ecuația undelor, profilul pachetului de unde poate rămâne constant (fără dispersie) sau se poate schimba (dispersie) în timpul propagării.

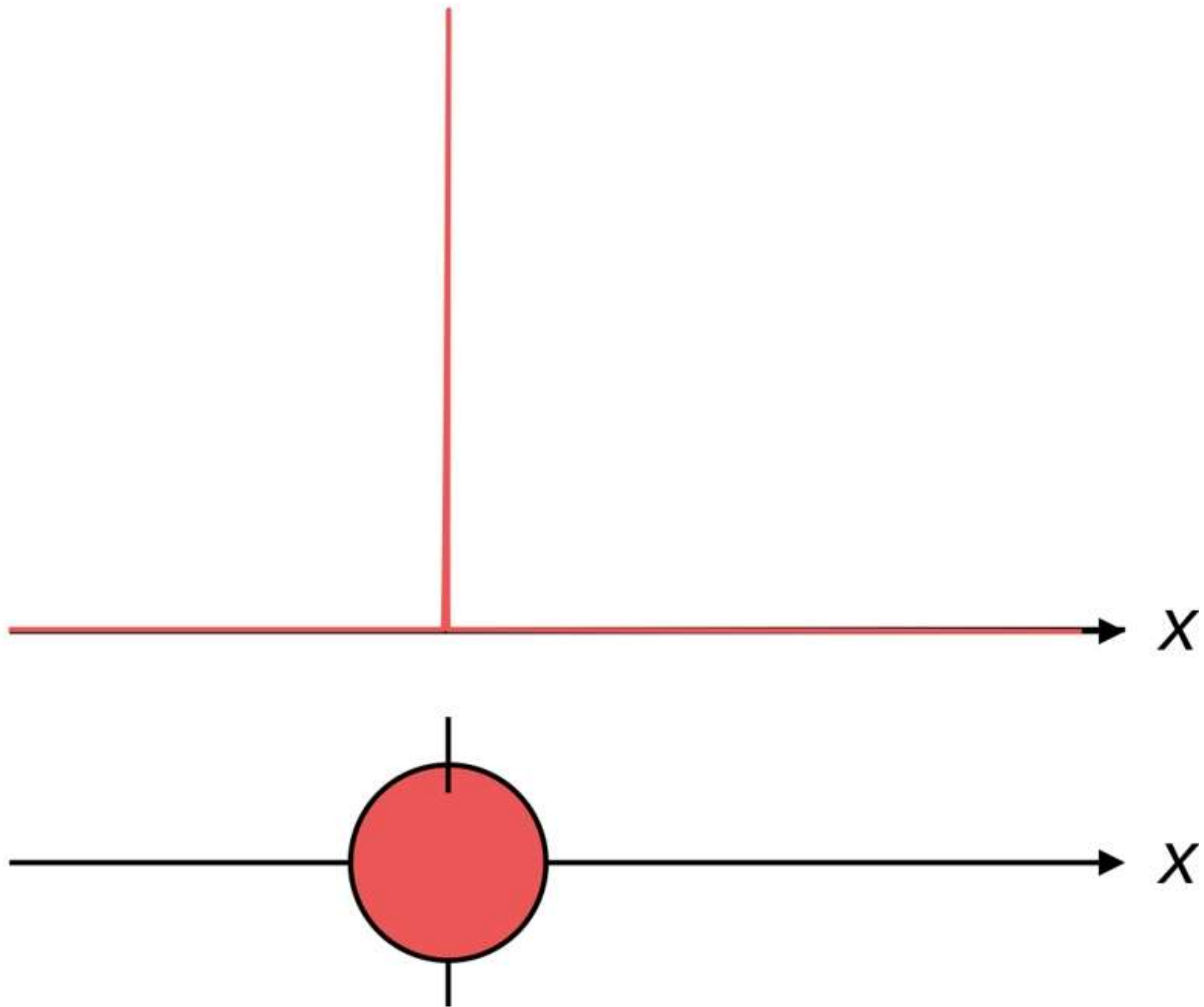
Mecanica cuantică atribuie o semnificație specială pachetului de unde; este interpretat ca o amplitudine de probabilitate, norma sa la pătrat descriind densitatea de probabilitate pe care o particulă sau particule într-o anumită stare vor fi măsurate pentru a avea o poziție sau un moment dat. Ecuația undelor este în acest caz ecuația Schrödinger. Este posibil să se deducă evoluția timpului unui sistem mecanic cuantic, similar procesului formalismului hamiltonian în mecanica clasică. Caracterul dispersiv al soluțiilor ecuației lui Schrödinger a jucat un rol important în respingerea interpretării inițiale a lui Schrödinger și în acceptarea regulii Born.

În reprezentarea coordonatelor undei (cum ar fi sistemul de coordonate carteziene), poziția probabilității localizate a obiectului fizic este specificată de poziția soluției pachetului. Mai mult, cu cât pachetul de undă spațial este mai îngust și, prin urmare, cu cât este mai bine localizată poziția pachetului de unde, cu atât este mai mare răspândirea în impulsul undei. Acest compromis între răspândirea în poziție și răspândirea în impuls este o caracteristică a principiului incertitudinii Heisenberg.

Unde și particule în mișcare



(Creșterea nivelului de localizare a pachetului de unde, adică particula are o poziție mai localizată.)



(La limita ħ → 0, poziția și impulsul particulei devin exact cunoscute. Această situație este echivalentă cu cea a particulelor clasice.)

Schrödinger a impus ca o soluție a pachetului de unde lângă poziția **r** cu un vectorul de undă aproape de **k** se va deplasa de-a lungul traiectoriei determinate de mecanica clasică pentru impulsuri suficient de mici pentru împrăștierea în k (și, prin urmare, în viteză). Întrucât, pentru o anumită împrăștiere în k, împrăștierea vitezei vectoriale este proporțională cu constanta lui Planck,, uneori se spune că la limită când *ħ* se apropie de zero, ecuațiile mecanicii clasice sunt restaurate din mecanica cuantică. Este necesară o mare atenție în ceea ce privește modul în care este luată această limită și în ce cazuri.

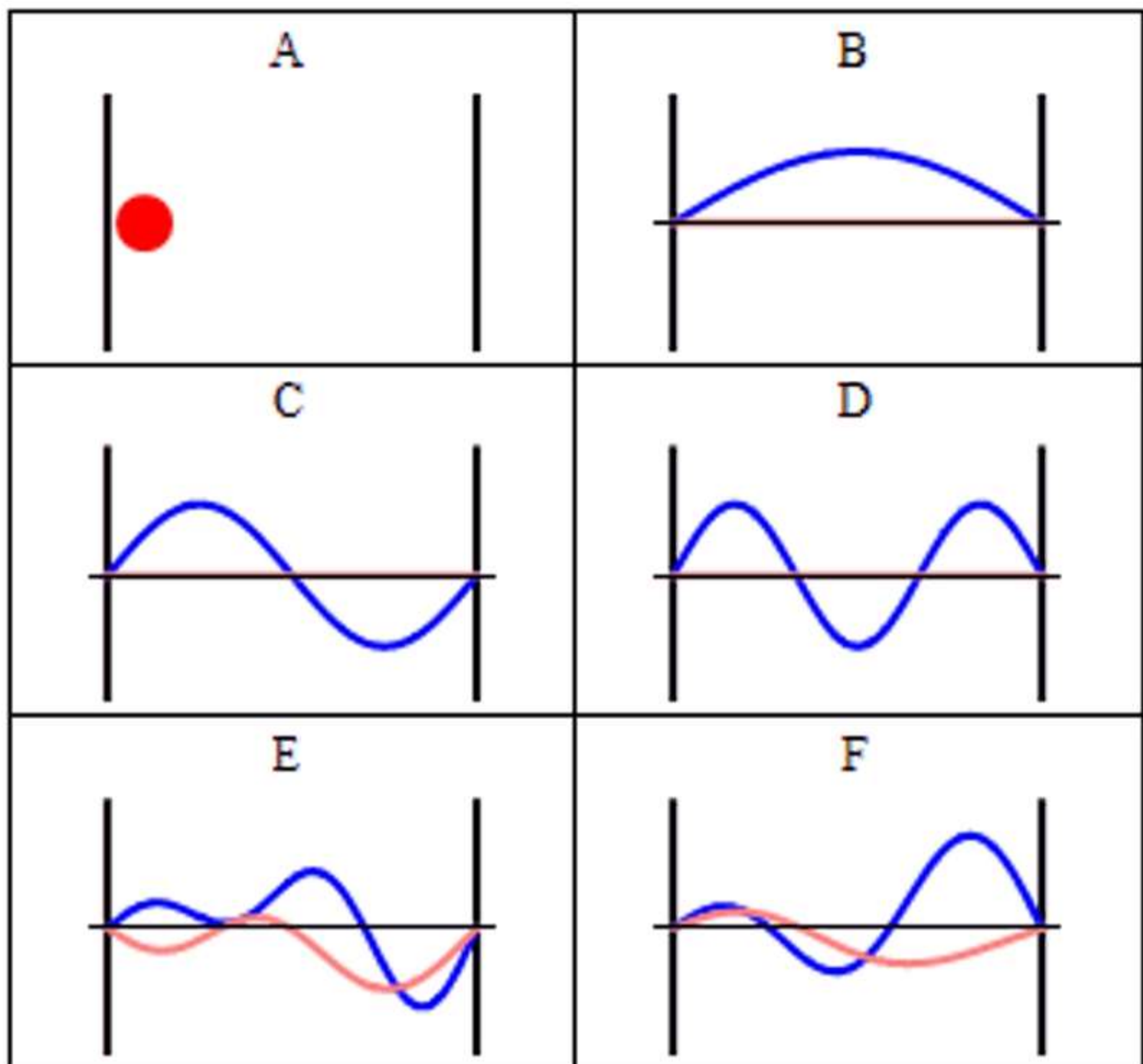
Lungimea de undă scurtă limită este echivalentă cu *ħ* tinde către zero, deoarece acesta este un caz limită de creștere a localizării pachetului de unde în poziția definită a particulei (a se vedea

imaginea). Folosind principiul incertitudinii lui Heisenberg pentru poziție și impuls, produsele de incertitudine în poziție și impuls devin zero când $\hbar \to 0$:

...

5 Soluții ale ecuației Schrödinger

5.1 Particulă într-o cutie unidimensională



(Unele traiectorii ale unei particule într-o cutie conform legilor lui Newton din mecanica clasică (A) și conform ecuației Schrödinger a mecanicii cuantice (B-F). În (B-F), axa orizontală este poziția, iar axa verticală este partea reală (albastră) și partea imaginară (roșie) a funcției de

undă. Stările (B, C, D) sunt energii energetice, dar (E, F) nu sunt. https://www.youtube.com/watch?v=nBAnhBrNDg0)

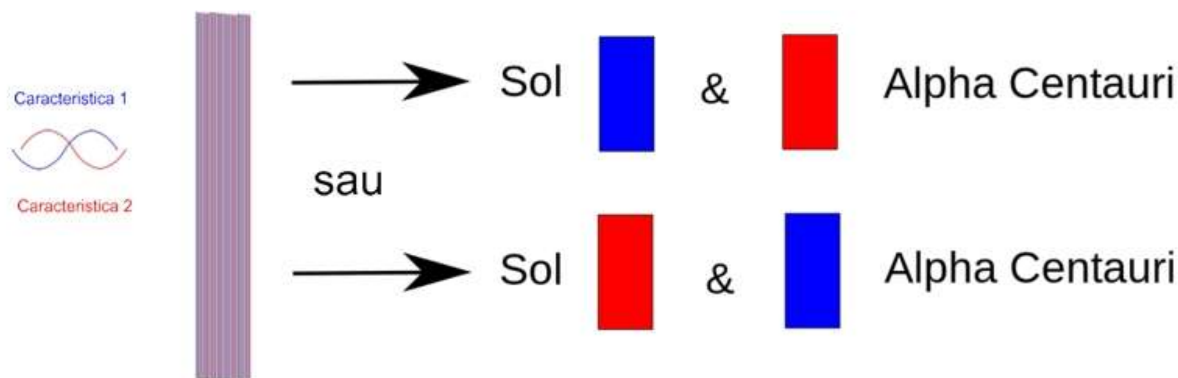
În mecanica cuantică, modelul **particula într-o cutie** (cunoscut și sub numele de **puț de potențial infinit** sau de **puț pătrat infinit**) descrie o particulă liberă în a se deplasa într-un spațiu mic înconjurat de bariere impenetrabile. Modelul este folosit în principal ca exemplu ipotetic pentru a ilustra diferențele dintre sistemele clasice și cuantice. În sistemele clasice, de exemplu, pentru o minge prinsă în interiorul unei cutii mari, particula se poate mișca cu orice viteză în cutie și nu este mai probabil să se găsească într-o poziție decât în alta. Cu toate acestea, atunci când puțul devine foarte îngustă (la scara câtorva nanometri), efectele cuantice devin importante. Particula poate ocupa doar anumite nivele energetice pozitive. De asemenea, nu poate avea niciodată energie zero, ceea ce înseamnă că particula nu poate niciodată "sta liniștită". În plus, este mult mai probabil să se găsească în anumite poziții decât în altele, în funcție de nivelul de energie. Particula nu poate fi niciodată detectată în anumite poziții, cunoscute ca noduri spațiale.

Modelul particulei într-o cutie este una dintre puținele probleme din mecanica cuantică care pot fi rezolvate analitic, fără aproximări. Datorită simplității sale, modelul permite înțelegerea efectelor cuantice fără a fi nevoie de o matematică complicată. Aceasta servește ca o simplă ilustrare a modului în care se realizează *cuantificarea energiei* (*nivelurile de energie*), care se găsesc în sisteme cuantice mai complexe, cum ar fi atomii și moleculele. Este una din primele probleme de mecanică cuantică predate în cursurile de fizică universitară și este frecvent folosită ca o aproximare pentru sisteme cuantice mai complicate.

...

6 Paradoxuri și interpretări ale mecanicii cuantice

6.1 Inseparabilitatea cuantică



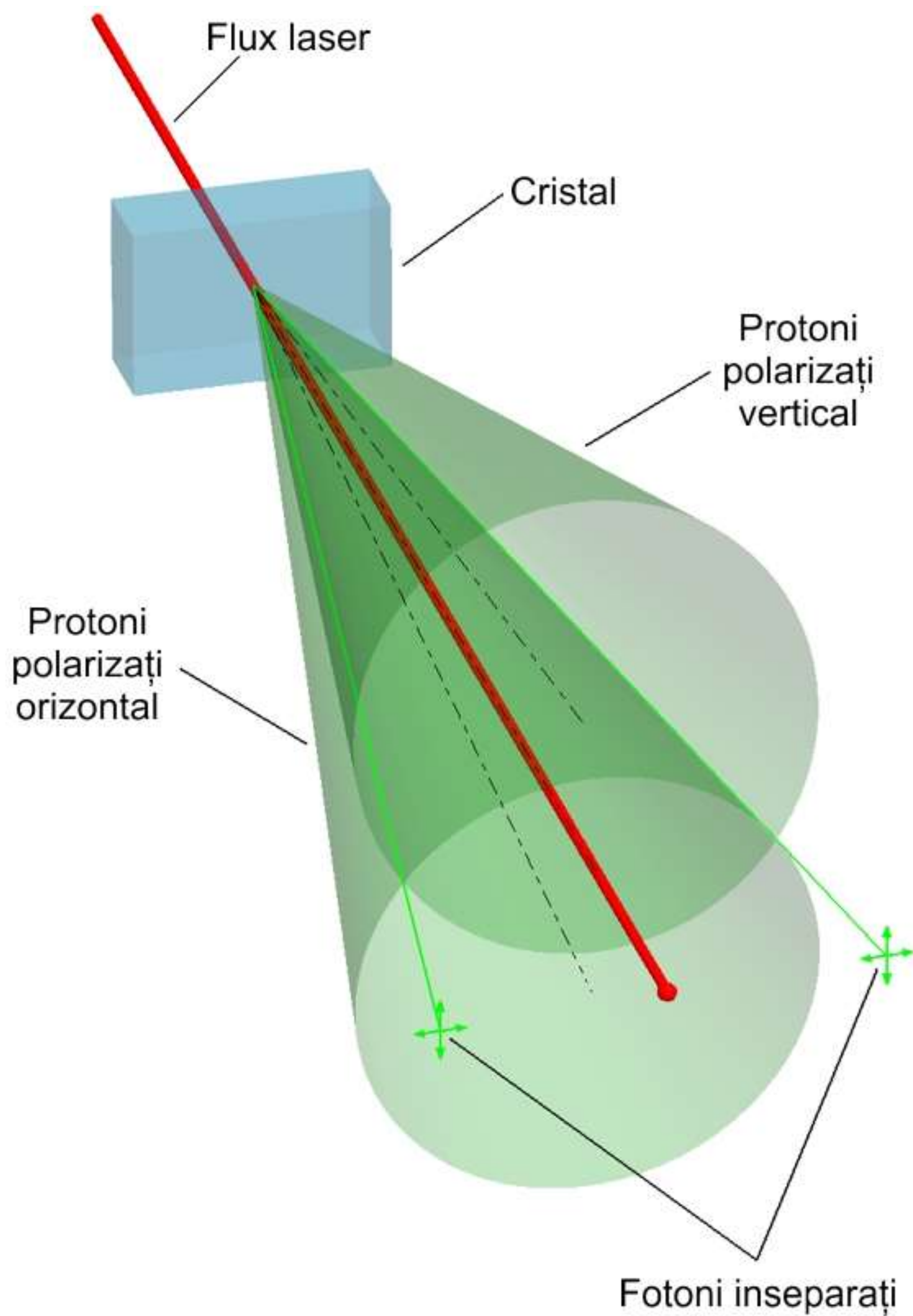
(Suprapunerea a două caracteristici cuantice, și două posibilități de rezolvare. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Superposition.svg)

Principiul excluziunii Pauli spune că doi electroni dintr-un sistem nu pot fi în aceeași stare. Natura însă deschide posibilitatea ca doi electroni să aibă ambele stări „suprapuse” peste fiecare dintre ei. Funcțiile de undă care apar simultan din fante duble ajung la ecranul de detectare într-o stare de suprapunere. Nimic nu este sigur până când forma de undă suprapusă „colapsează”. În acel moment, un electron apare undeva, în conformitate cu probabilitatea că este pătratul valorii absolute a sumei amplitudinilor complexe evaluate ale celor două forme de undă suprapuse. Situația este deja foarte abstractă. Un mod concret de a gândi despre fotoni inseparați, fotoni în care două stări contradictorii sunt suprapuse pe fiecare dintre ei în același eveniment, este după cum urmează:

Imaginați-vă că superpoziția unei stări marcată *albastru*, și o altă stare marcată *roșu,* apar (în imaginație) ca o stare *purpurie*. Doi fotoni sunt produși ca rezultat al aceluiași eveniment atomic. Poate că ei sunt produși prin excitarea unui cristal care absoarbe în mod caracteristic un foton de o anumită frecvență și emite doi fotoni cu jumătate din frecvența inițială. Deci cei doi fotoni rezultați sunt în o stare *violet*. Dacă experimentatorul efectuează acum un experiment să determine dacă unul dintre fotoni este fie albastru fie roșu, atunci experimentul respectiv modifică fotonul implicat dintr-unul care are o suprapunere de caracteristici *albastru* și *roșu* la un foton care are numai una din aceste caracteristici. Problema pe care Einstein o avea cu o situație astfel imaginată era că dacă unul dintre acești fotoni a fost ținut strâns între oglinzi într-un laborator de pe pământ, iar celălalt a călătorit la jumătatea distanței până la cea mai apropiată stea, când geamănul său a fost făcut să se dezvăluie ca fiind fie albastru fie roșu, aceasta înseamnă că fotonul îndepărtat își va pierde acum starea *purpurie*. Deci, ori de câte ori ar putea fi investigat după măsurarea geamănului său, ar fi în mod necesar să apară în starea opusă oricărei stări revelată a o avea geamănul său.

În încercarea de a arăta că mecanica cuantică nu era o teorie completă, Einstein a început cu prezicerea teoriei că două sau mai multe particule care au interacționat în trecut pot să apară puternic corelate atunci când diferitele lor proprietăți sunt ulterior măsurate. El a încercat să explice această interacțiune aparentă într-un mod clasic, prin trecutul lor comun și, de preferință, nu prin „acțiuni înfricoșătoare de la distanță”. Argumentul este elaborat într-o lucrare renumită, Einstein, Podolsky și Rosen (1935, abreviată EPR), care stabilește ceea ce se numește acum *paradoxul EPR*. Presupunând ceea ce acum se numește realism local, EPR a încercat să demonstreze din teoria cuantică că o particulă are simultan poziția și impulsul, în timp ce conform interpretării de la Copenhaga, numai una dintre aceste două proprietăți există și numai în momentul în care este măsurată. EPR a concluzionat că teoria cuantică este incompletă prin faptul că refuză să ia în considerare proprietățile fizice care există în mod obiectiv în natură. (Einstein, Podolsky și Rosen 1935 este în prezent cea mai citată publicație a lui Einstein în revistele de fizică.) În același an, Erwin Schrödinger a folosit cuvântul „inseparabilitate” și a declarat: „Nu aș numi-o ca fiind *una din*, ci mai degrabă *trăsătura* caracteristică a mecanicii cuantice.“ Problema dacă inseparabilitatea este o condiție reală este încă în dispută. Inegalitățile Bell sunt cea mai puternică provocare a pretențiilor lui Einstein.

Inseparabilitatea cuantică



(Procesul de conversie joasă parametrică spontană poate separa fotonii în perechi de fotoni de tip II cu polarizare reciprocă perpendiculară. https://en.wikipedia.org/wiki/File:SPDC_figure.png)

Inseparabilitatea cuantică (**entanglementul cuantic**) este un fenomen fizic care apare atunci când perechi sau grupuri de particule sunt generate sau interacționează astfel încât starea cuantică a fiecărei particule nu poate fi descrisă independent de celelalte, chiar și când particulele sunt separate la o distanță mare – practic, o stare cuantică trebuie să fie descrisă pentru sistem ca un întreg.

Măsurătorile proprietăților fizice, cum ar fi poziția, impulsul, spinul și polarizarea, efectuate pe particulele inseparabile, se dovedesc a fi corelate. De exemplu, dacă o pereche de particule este generată în așa fel încât spinul total este cunoscut a fi zero și se constată că o particulă are spinul în sensul acelor de ceasornic pe o anumită axă, spinul celeilalte particule, măsurat pe aceeași axă , va fi găsit ca fiind în sens invers acelor de ceasornic, așa cum se poate aștepta datorită inseparabilității acestora. Dar acest comportament generează efecte paradoxale: orice măsurătoare a unei proprietăți a unei particule poate fi văzută ca acționând asupra acelei particule (de exemplu, prin colapsarea unui număr de stări suprapuse) și va schimba proprietatea cuantică inițială cu o anumită cantitate necunoscută; iar în cazul particulelor inseparabile o astfel de măsurătoare va fi pe sistemul inseparabil ca un întreg. Apare astfel că o particulă a unei perechi inseparate „știe” ce măsurătoare a fost efectuată pe cealaltă și cu ce rezultat, chiar dacă nu există mijloace cunoscute pentru comunicarea unor astfel de informații între particulele care, la momentul măsurării pot fi separate prin distanțe de dimensiuni arbitrar de mari.

Astfel de fenomene au făcut obiectul unei lucrări din 1935 a lui Albert Einstein, Boris Podolsky și Nathan Rosen și a unor lucrări ale lui Erwin Schrödinger la scurt timp după aceea, care descriu ceea ce a devenit cunoscut sub numele de *paradoxul EPR* (Einstein–Podolsky–Rosen). Einstein și alții consideră că un astfel de comportament este imposibil, deoarece acesta ar încălca viziunea realistă locală a cauzalității (Einstein se referă la aceasta ca la „acțiunea înfricoșătoare la distanță”) și a susținut că formularea acceptată a mecanicii cuantice este, probabil, incompletă. Mai târziu, totuși, predicțiile contraintuitive ale mecanicii cuantice au fost verificate experimental. Au fost realizate experimente care implică măsurarea polarizării sau rotirii particulelor inseparate în direcții diferite, care prin producerea încălcărilor inegalității lui Bell demonstrează statistic că viziunea realistă locală nu poate fi corectă. Acest lucru s-a dovedit a se produce chiar și atunci când măsurătorile sunt efectuate mai repede decât ar putea călători lumina între locurile de măsurare: nu există nicio influență cu viteza egală sau mai mică decât a luminii între particulele inseparate. Experimentele recente au măsurat particulele inseparate la mai puțin de o sutime de procent din timpul de călătorie al luminii dintre ele. Conform formalismului teoriei cuantice, efectul măsurării se petrece instantaneu. Cu toate acestea, nu este posibil să se utilizeze acest efect pentru a transmite informații clasice la viteze mai mari decât lumina.

Inseparabilitatea cuantică este o zonă de cercetare extrem de activă de către comunitatea fizică, iar efectele sale au fost demonstrate experimental cu fotoni, neutrini, electroni, molecule și chiar diamante mici. Cercetarea se concentrează, de asemenea, asupra utilizării efectelor de inseparabilitate în comunicare și informatică.

...

7 Stările cuantice conform lui Dirac

În mecanica cuantică, **imaginea interacțiunilor** (cunoscută și sub numele de **imaginea lui Dirac** după Paul Dirac) este o reprezentare intermediară între imaginea lui Schrödinger și imaginea lui Heisenberg. În timp ce în celelalte două imagini, fie vectorul de stare, fie operatorii au dependență de timp, în imaginea interacțiunilor ambele au observabilele dependente de timp. Imaginea interacțiunilor este utilă în tratarea modificărilor funcțiilor de undă și a observabilelor datorate interacțiunilor. Majoritatea calculelor de ordin teoretic utilizează reprezentarea interacțiunilor, deoarece construiesc soluția pentru ecuația Schrödinger cu mai multe corpuri ca soluție pentru problema particulelor libere plus unele părți de interacțiuni necunoscute.

Ecuațiile care includ operatorii care acționează în momente diferite, care se află în imaginea interacțiunilor, nu se află neapărat în imaginea lui Schrödinger sau a lui Heisenberg. Acest lucru se datorează faptului că transformările unitare dependente de timp relaționează operatorii într-o singură imagine cu operatorii analogi din celelalte.

Definiție

Operatorii și vectorii de stare din imaginea interacțiunilor sunt legați de o schimbare de bază (transformare unitară) la aceiași operatori și vectori de stare din imaginea lui Schrödinger.

Pentru a trece în imaginea interacțiunilor, împărțim hamiltonianul imaginii Schrödinger în două părți:

$$H_S = H_{0,S} + H_{1,S}.$$

Orice alegere posibilă a părților va produce o imagine a interacțiunilor valabilă; dar pentru ca imaginea interacțiunilor să fie utilă în simplificarea analizei unei probleme, părțile vor fi alese în mod tipic astfel încât $H_{0,S}$ să fie bine înțeles și exact determinabil, în timp ce $H_{1,S}$ conține o perturbație mai dificil de analizat pentru acest sistem.

În cazul în care hamiltonianul are o dependență temporală explicită (de exemplu, dacă sistemul cuantic interacționează cu un câmp electric extern aplicat, care variază în timp), va fi de obicei avantajos să se includă termenii explicit dependenți de timp cu $H_{1,S}$, lăsând $H_{0,S}$ independent de timp. Continuăm să presupunem că acesta este cazul.

...

8 Corespondența cu mecanica clasică

Spre deosebire de ecuațiile de mișcare pentru descrierea mecanicii particulelor, care sunt sisteme de ecuații diferențiale obișnuite cuplate, ecuațiile analogice care guvernează dinamica undelor și câmpurilor sunt întotdeauna ecuații diferențiale parțiale, deoarece undele sau câmpurile sunt funcții de spațiu și timp. Pentru o soluție particulară, trebuie specificate condițiile limită împreună cu condițiile inițiale.

Uneori, în următoarele contexte, ecuațiile de undă sau câmp sunt numite și "ecuații de mișcare".

Ecuații de câmp

Ecuațiile care descriu dependența spațială și evoluția temporală a câmpurilor sunt numite *ecuații de câmp*. Acestea includ

- Ecuațiile lui Maxwell pentru câmpul electromagnetic,
- Ecuația lui Poisson pentru potențialul de câmpul electrostatic sau gravitațional newtonian,
- Ecuația câmpului Einstein pentru gravitație (legea gravitației lui Newton este un caz special pentru câmpurile gravitaționale slabe și vitezele reduse ale particulelor).

Această terminologie nu este universală: de exemplu, deși ecuațiile Navier-Stokes guvernează câmpul de viteză al unui fluid, acestea nu sunt denumite de obicei "ecuații de câmp", deoarece în acest context ele reprezintă impulsul fluidului și se numesc în schimb "ecuații de impuls".

Ecuații de undă

Ecuațiile de mișcare a undelor sunt numite *ecuații de undă*. Soluțiile la o ecuație de undă dau evoluția temporală și dependența spațială a amplitudinii. Condițiile limită determină dacă soluțiile descriu unde de deplasare sau unde staționare.

Din ecuațiile clasice ale mișcărilor și ale ecuațiilor de câmp pot fi derivate undele mecanice, gravitaționale și electromagnetice. Ecuația generală liniară de undă în 3D este:

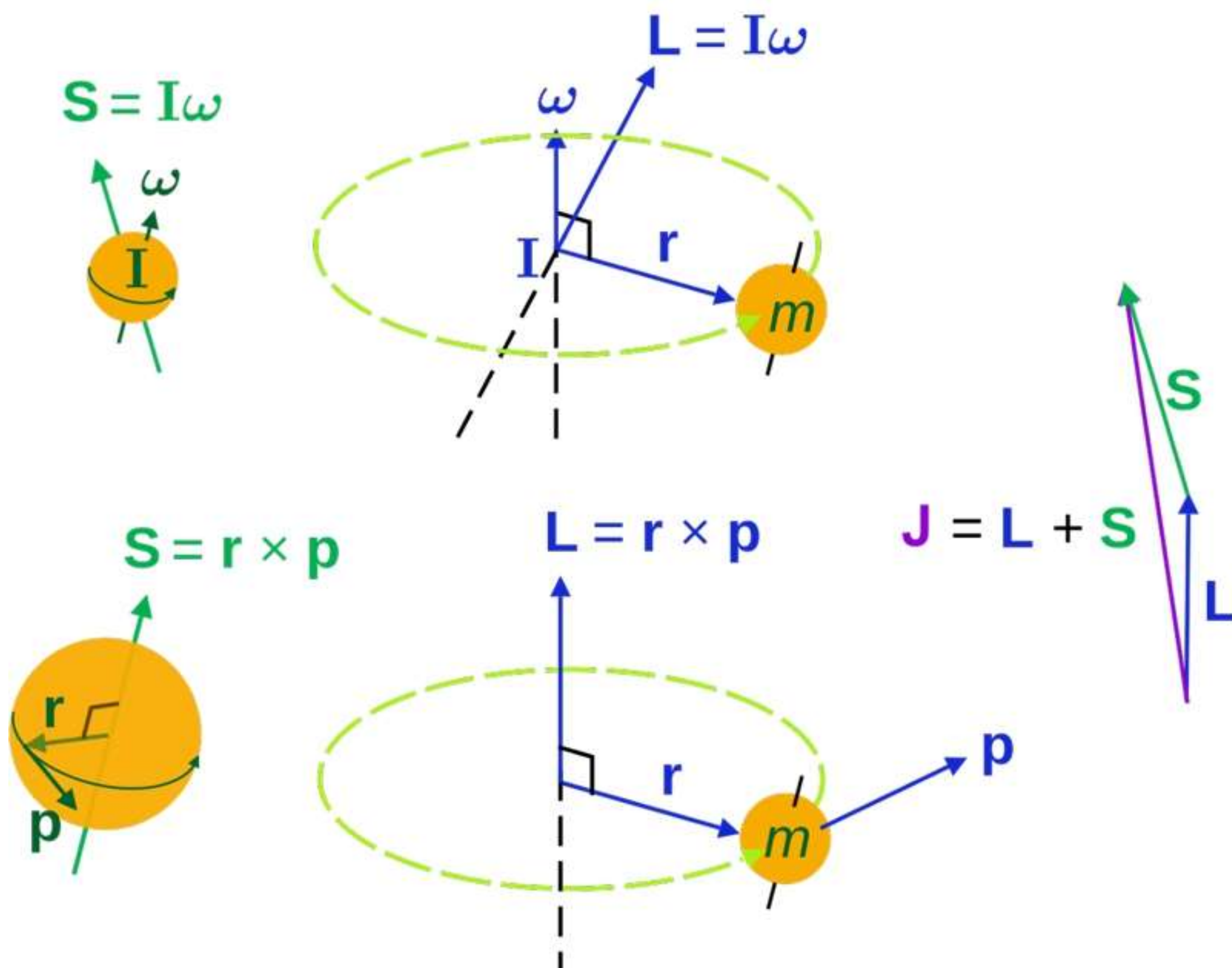
...

9 Momentul unghiular și spinul

9.1 Momentul unghiular

Momentul unghiular în mecanica cuantică diferă în multe aspecte profunde de momentul unghiular în mecanica clasică. În mecanica cuantică relativistă, acesta diferă și mai mult, definiția relativistă devenind un operator tensorial.

Moment ungiular de spin, orbital, și total



(Momentul unghiular al unui obiect clasic ***Stânga****: Momentul unghiular de "spin" este un moment unghiular orbital al obiectului în orice punct.* ***Dreapta****: Momentul unghiular orbital extrinsec* ***L*** *în jurul unei axe.* ***Sus****: Momentul tensorului inerțial* ***I*** *și vitezei unghiulare* ***ω*** *(****L*** *nu este întotdeauna paralel cu ω).* ***Jos****: Momentul* ***p*** *și poziția sa radială* ***r*** *de la axă Momentul unghiular total (de spin plus orbital) este* ***J****. Pentru o particulă cuantică interpretările sunt diferite, spinul particulelor* nu *are interpretarea de mai sus.)*

Definiția clasică a momentul unghiular ca **L** = **r** × **p** poate fi transferată mecanicii cuantice, prin reinterpretarea lui **r** ca operator de poziție cuantică și **p** ca a operatorului de impuls cuantic. **L** este atunci un operator, denumit în mod specific *operatorul momentului unghiular orbital*. Componentele operatorului momentului unghiular satisfac relațiile de comutație ale algebrului Lie so(3). Într-adevăr, acești operatori sunt tocmai acțiunea infinitezimală a grupului de rotație pe spațiul Hilbert cuantic.

Cu toate acestea, în fizica cuantică, există un alt tip de moment unghiular, numit *momentul unghiular de spin*, reprezentat de operatorul de spin **S**. Aproape toate particulele elementare au spin. Spinul este deseori descris ca o particulă care se rotește literalmente în jurul unei axe, dar aceasta este o imagine înșelătoare și inexactă: spinul este o proprietate intrinsecă a unei particule, fără legătură cu orice fel de mișcare în spațiu și fundamental diferită de momentul unghiular

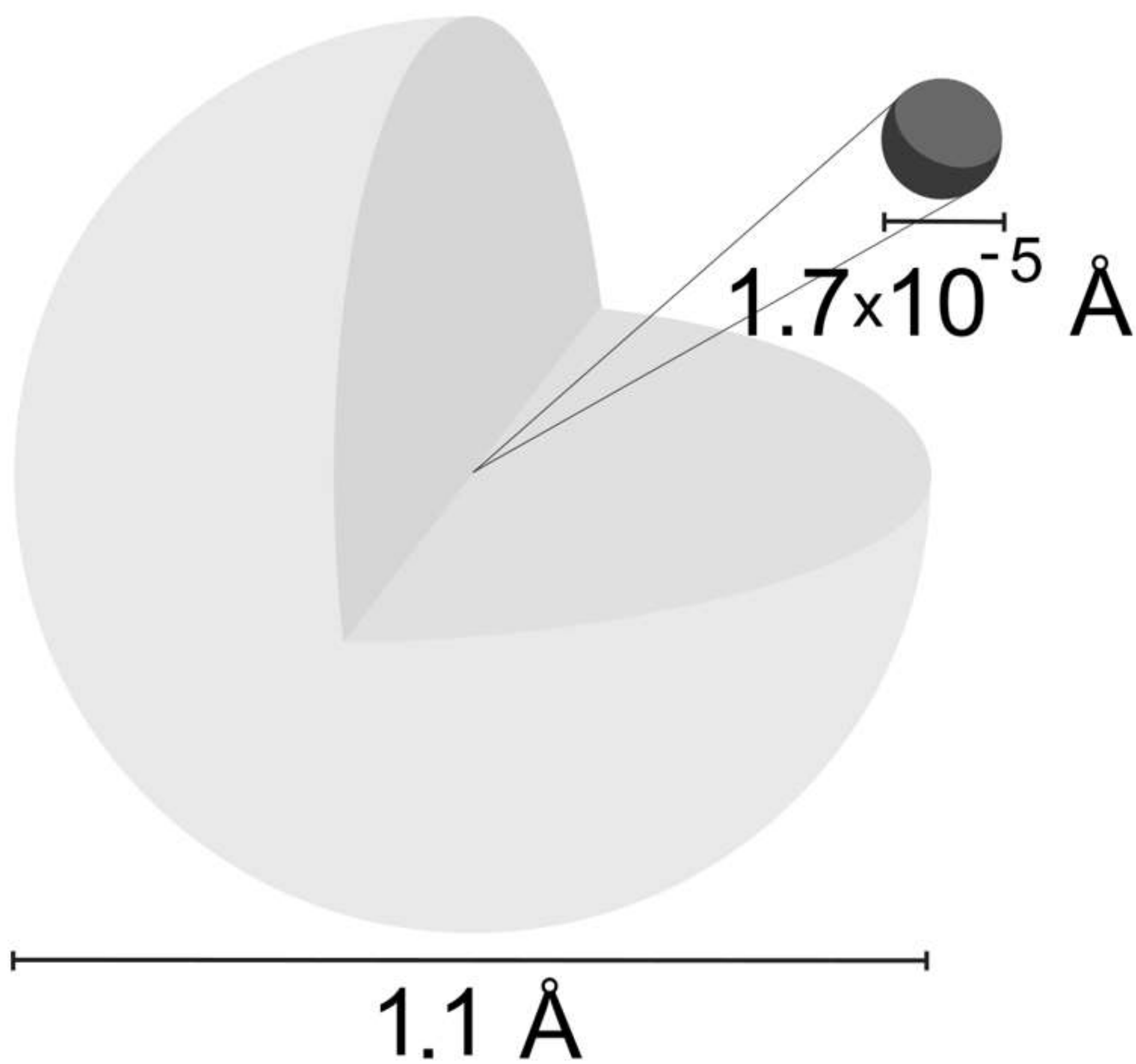
orbital. Toate particulele elementare au un spin caracteristic, de exemplu electronii au "spin 1/2" (aceasta inseamna de fapt "spin ħ/2") în timp ce fotonii au "spin 1" (asta inseamna "spin ħ").

În cele din urmă, există un moment unghiular total **J**, care combină momentul unghiular de spin și orbitalul al tuturor particulelor și câmpurilor. (Pentru o particulă, **J** = **L** + **S**.) Conservarea momentului unghiular se aplică la **J**, dar nu la **L** sau **S**; de exemplu, interacțiunea spin-orbită permite momentului unghiular să se transfere înainte și înapoi între **L** și **S**, cu constanta totală rămasă. Electronii și fotonii nu trebuie să aibă valori bazate pe numere întregi pentru un moment unghiular total, dar pot avea și valori fracționare.

...

10 Materia cuantică

10.1 Atomul de hidrogen



(Un atom de hidrogen cu diametrul aproximativ de două ori raza modelului Bohr. (Imaginea nu este la scară))

General
Nume, simbol : protium, ^{1}H
Neutroni : 0
Protoni : 1
Date nuclid
Abundența naturală : 99.985%
Masa izotopilor : 1.007825 u
Spin : 1/2
Energia în exces : 7288.969±0.001 keV
Energie de legătură >>> 0.000±0.0000 keV

Atomul de hidrogen este electric neutru conținând un singur proton încărcat pozitiv și un singur electron încărcat negativ legat la nucleu de forța Coulomb. Hidrogenul atomic reprezintă aproximativ 75% din masa barionică a universului.

În viața de zi cu zi de pe Pământ, atomii de hidrogen izolați (numiți "hidrogen atomic") sunt extrem de rari. În schimb, hidrogenul are tendința de a se combina cu alți atomi în compuși sau cu el însuși pentru a forma gazul hidrogen normal (diatomic), H_2. "Hidrogenul atomic" și "atomul de hidrogen", în uzul obișnuit al limbii, au semnificații suprapuse, dar distincte. De exemplu, o moleculă de apă conține doi atomi de hidrogen, dar nu conține hidrogen atomic (care se referă la atomi de hidrogen izolați).

Încercările de a dezvolta o înțelegere teoretică a atomului de hidrogen au fost importante pentru istoria mecanicii cuantice. Acesta este singurul element fără un neutron.

Izotopi

Cel mai abundent izotop, hidrogen-1, protiu sau hidrogen ușor, nu conține neutroni și are doar un proton și un electron. Protiul este stabil și reprezintă 99,985% din atomii de hidrogen care apar în mod natural.

Deuteriul conține un neutron și un proton. Deuteriul este stabil, reprezintă 0,0156% din hidrogen natural, și este utilizat în procese industriale precum reactoarele nucleare și rezonanța magnetică nucleară.

Tritiul conține doi neutroni și un proton și nu este stabil, se dezintegrează cu un timp de înjumătățire de 12,32 ani. Datorită duratei scurte de înjumătățire, tritiul nu se găsește în natură, cu excepția unor cantități mici.

Izotopii mai mari ai hidrogenului sunt creați numai în acceleratoare și reactoare artificiale și au timpi de înjumătățire de ordinul a 10^{-22} secunde.

Formulele de mai jos sunt valabile pentru toți cei trei izotopi ai hidrogenului, dar pentru fiecare izotop de hidrogen trebuie utilizate valori ușor diferite ale constantei Rydberg (formula de corecție dată mai jos).

...

11 Perturbații

În mecanica cuantică, **teoria perturbației** este un set de scheme de aproximare direct legate de o perturbație matematică pentru a descrie un sistem cuantic complicat în termeni mai simpli. Ideea este să începem cu un sistem simplu pentru care este cunoscută o soluție matematică și să adăugăm un Hamiltonian suplimentar "perturbator", reprezentând o perturbație slabă a sistemului. Dacă perturbația nu este prea mare, diferitele cantități fizice asociate cu sistemul perturbat (de exemplu, nivelurile de energie și stările proprii) pot fi exprimate drept "corecții" cu

cele ale sistemului simplu. Aceste corecții, care sunt mici în comparație cu mărimea cantităților în sine, pot fi calculate folosind metode aproximative, cum ar fi seriile asimptotice. Sistemul complicat poate fi, prin urmare, studiat pe baza cunoașterii celui mai simplu. În realitate, se descrie un sistem complicat nerezolvat folosind un sistem simplu, rezolvat.

Hamiltonieni aproximați

Teoria perturbației este un instrument important pentru descrierea sistemelor cuantice reale, deoarece se dovedește a fi foarte dificil să se găsească soluții exacte pentru ecuația lui Schrödinger pentru hamiltonieni de complexitate chiar și moderată. Hamiltonienii, cărora le cunoaștem soluțiile exacte, cum ar fi atomul de hidrogen, oscilatorul cuantic armonic și particula într-o cutie, sunt prea idealizați pentru a descrie în mod adecvat majoritatea sistemelor. Folosind teoria perturbației, putem folosi soluțiile cunoscute ale acestor hamiltonieni simpli pentru a genera soluții pentru o serie de sisteme mai complicate.

Aplicarea teoriei perturbației

Teoria perturbației este aplicabilă dacă problema la îndemână nu poate fi rezolvată exact, dar poate fi formulată prin adăugarea unui termen "mic" la descrierea matematică a problemei care este exact rezolvabilă.

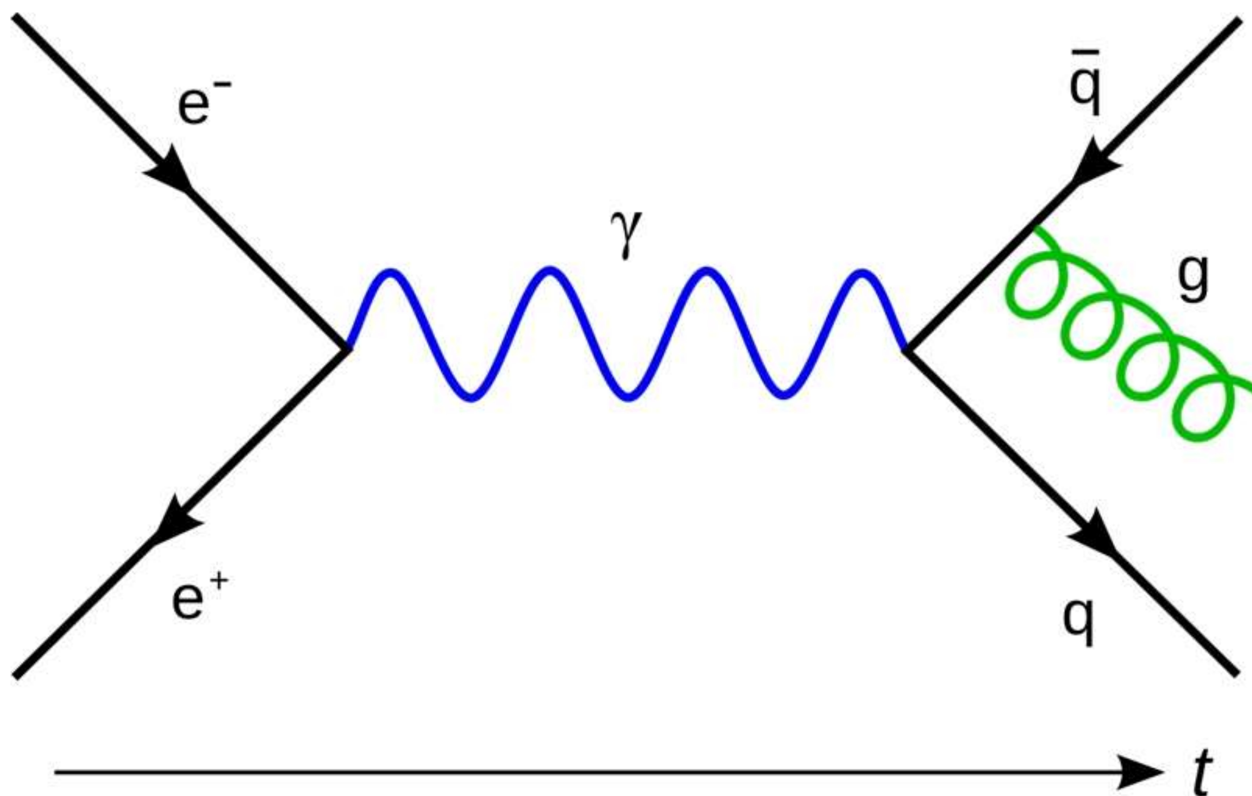
De exemplu, prin adăugarea unui potențial electric perturbativ la modelul mecanic cuantic al atomului de hidrogen, pot fi calculate mici schimbări în liniile spectrale ale hidrogenului determinate de prezența unui câmp electric. Aceasta este doar aproximativă deoarece suma unui potențial Coulomb cu un potențial liniar este instabilă, deși timpul de tunel este foarte lung. Această instabilitate apare ca o extindere a liniilor spectrului de energie, pe care teoria perturbației nu o reproduce în totalitate.

Expresiile produse de teoria perturbației nu sunt exacte, dar pot conduce la rezultate exacte atâta timp cât parametrul de expansiune, să spunem a, este foarte mic. În mod tipic, rezultatele sunt exprimate în termeni de serii de putere finită în α care par să conveargă la valorile exacte atunci când sunt însumate la ordinea superioară. După o anumită ordine $n \sim 1/\alpha$ totuși, rezultatele devin din ce în ce mai proaste, de vreme ce seriile sunt de obicei divergente (fiind serii asimptotice). Există modalități de a le converti în serii convergente, care pot fi evaluate pentru parametrii de extindere mai mare, cel mai eficient prin metoda variațională.

În teoria electrodinamicii cuantice, în care interacțiunea electron-foton este tratată perturbativ, calculul momentului magnetic al electronului a fost găsit pentru acest experiment, ca fiind în acord cu unsprezece zecimale. În electrodinamica cuantică și în alte teorii ale câmpului cuantic, tehnicile de calcul speciale, cunoscute sub numele de diagrame Feynman, sunt utilizate pentru a însuma sistematic termenii seriilor de putere.

...

12 Teoria cuantică a câmpului



(Diagrama Feynman.
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Feynmann_Diagram_Gluon_Radiation.svg)

Ideea teoriei câmpului cuantic a început la sfârșitul anilor 1920 cu fizicianul britanic Paul Dirac, când a încercat să cuantizeze câmpul electromagnetic – o procedură de construire a unei teorii cuantice pornind de la o teorie clasică.

Un *câmp* în fizică este „o regiune sau un spațiu în care există un anumit efect (cum ar fi magnetismul)”. Alte efecte care se manifestă sub formă de câmpuri sunt gravitația și electricitatea statică. [47] În 2008, fizicianul Richard Hammond a scris că

”Uneori distingem între mecanica cuantică (MC) și teoria cuantică a câmpului (TCC). MC se referă la un sistem în care numărul de particule este fixat, iar câmpurile (cum ar fi câmpul electromecanic) sunt entități clasice continue. TCC … merge un pas mai departe și permite crearea și anihilarea particulelor…”

El a adăugat, totuși, că mecanica cuantică este adesea folosită pentru a se referi la „întreaga noțiune a viziunii cuantice”.

În 1931, Dirac a propus existența unor particule care mai târziu au devenit cunoscute ca antimaterie. Dirac a partajat Premiul Nobel pentru Fizică în 1933 cu Schrödinger „pentru descoperirea unor noi forme productive ale teoriei atomice”.

Teoria cuantică a câmpului permite un număr infinit de particule și permite teoriei să prezică câte și cu ce probabilități ar trebui să existe. Când se dezvoltă în continuare, teoria adesea contrazice

observarea, astfel încât operatorii săi de creație și anihilare pot fi legați empiric. Mai mult, legile empirice de conservare, cum ar fi cea pentru masă-energie, sugerează anumite constrângeri asupra formei matematice a teoriei, din punct de vedere matematic. Acest ultim fapt servește atât pentru a face teoriile cuantice ale câmpului dificil de manevrat, cât și pentru restricții suplimentare asupra formelor admisibile ale teoriei.

În fizica teoretică, teoria cuantică a câmpului (TCC) este cadrul teoretic pentru construirea modelelor mecanicii cuantice ale particulelor subatomice în fizica particulelor și quasi-particulele în fizica materiei condensate. Este un set de noțiuni și instrumente matematice care combină câmpurile clasice, relativitatea specială și mecanica cuantică. Atunci când este combinat cu principiul de descompunere al clusterului, acesta poate fi *singurul* mod de a face acest lucru, păstrând în același timp ideile particulelor punctuale cuantice și ale localității. TCC a fost considerată anterior cu adevărat fundamentală; totuși, acum se crede, în primul rând din cauza eșecurilor continue ale cuantificării relativității generale, a fi doar o aproximare foarte bună a energiei joase, adică o teorie eficientă a câmpului, intermediară spre o teorie mai fundamentală.

TCC tratează particulele ca stări excitate ale unui câmp de bază, deci acestea sunt numite cuante de câmp. În teoria cuantică a câmpului, interacțiunile mecanice cuantice între particule sunt descrise prin termenii de interacțiune între câmpurile cuantice corespunzătoare. Aceste interacțiuni sunt vizualizate în mod convenabil de către diagramele Feynman, care sunt un instrument formal al teoriei perturbațiilor covariate relativist, care servesc la evaluarea proceselor particulare.

...

13 Modelul standard

Modelul Standard al particulelor elementare

trei generații de materie (fermioni)

	I	II	III		
masa / sarcina / spin	≈2.4 MeV/c² 2/3 1/2 u up	≈1.275 GeV/c² 2/3 1/2 c charm	≈172.44 GeV/c² 2/3 1/2 t top	0 0 1 g gluon	≈125.09 GeV/c² 0 0 H Higgs
CUARCI	≈4.8 MeV/c² -1/3 1/2 d down	≈95 MeV/c² -1/3 1/2 s strange	≈4.18 GeV/c² -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 γ photon	
LEPTONI	≈0.511 MeV/c² -1 1/2 e electron	≈105.67 MeV/c² -1 1/2 μ muon	≈1.7768 GeV/c² -1 1/2 τ tau	≈91.19 GeV/c² 0 1 Z Z boson	
	<2.2 eV/c² 0 1/2 ν_e electron neutrino	<1.7 MeV/c² 0 1/2 ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV/c² 0 1/2 ν_τ tau neutrino	≈80.39 GeV/c² ±1 1 W W boson	

BOSONI GAUGE

BOSONI SCALARI

(Particulele elementare incluse în Modelul Standard)

Acest articol include o listă a diferitelor tipuri de particule atomice și sub-atomice găsite sau presupuse a exista în întregul univers clasificat după tip. Proprietățile diferitelor particule enumerate sunt de asemenea date, precum și legile pe care le urmează particulele.

Particule elementare

Particulele elementare sunt particule fără structură internă măsurabilă; adică, nu se știe dacă ele sunt compuse din alte particule. Acestea sunt obiectele fundamentale ale teoriei câmpului cuantic. Există multe familii și sub-familii de particule elementare. Particulele elementare sunt clasificate în funcție de spinul lor. Fermionii au spin semi-întreg în timp ce bosonii au spin întreg. Toate particulele modelului standard au fost observate experimental, recent incluzând

bosonul Higgs. Multe alte particule elementare ipotetice, cum ar fi gravitonul, au fost propuse, dar nu au fost observate experimental.

Fermioni

Fermionii sunt una dintre cele două clase fundamentale de particule, cealaltă fiind bosonii. Fermionii sunt descriși de statisticile Fermi-Dirac și au numere cuantice descrise de principiul excluziunii Pauli. Aceștia includ cuarcii și leptonii, precum și orice particule compuse constând dintr-un număr impar de acestea, cum ar fi toți barionii și mulți atomi și nuclee.

Fermionii au spin semi-întreg; pentru toți fermionii elementari cunoscuți, acesta este de 1/2. Toți fermionii cunoscuți, cu excepția neutrinilor, sunt de asemenea fermioni Dirac; adică fiecare fermion cunoscut are propria antiparticulă distinctă. Nu se știe dacă neutrino este un fermion Dirac sau un fermion Majorana. Fermionii sunt elementele de bază ale tuturor materialelor. Aceștia sunt clasificați după cum interacționează prin forța culorii sau nu. În modelul standard, există 12 tipuri de fermioni elementari: șase cuarci și șase leptoni.

Cuarci

Cuarcii sunt constituenții fundamentali ai hadronilor și interacționează prin interacțiunea puternică. Cuarcii sunt singurii purtători cunoscuți ai sarcinii fracționale, dar pentru că se combină în grupuri de trei (barioni) sau în perechi de un cuarc și un anticuarc (mezoni), se observă numai o sarcină numă întreg în natură. Antiparticulele lor respective sunt anticuarci, care sunt identice, cu excepția faptului că acestea poartă sarcină electrică opusă (de exemplu, cuarcul up poartă sarcina $+\frac{2}{3}$, în timp ce anticuarcul poartă sarcină $-\frac{2}{3}$), sarcină de culoare și număr barionic. Există șase arome de cuarci; cei trei cuarcuri încărcați pozitiv sunt denumiți "cuarci de tip up" iar cele trei cuarci încărcați negativ sunt numiți "cuarci de tip down".

...

14 Gravitația cuantică

Gravitația cuantică este un domeniu al fizicii teoretice care încearcă să descrie gravitația în conformitate cu principiile mecanicii cuantice și unde efectele cuantice nu pot fi ignorate, cum ar fi obiectele astrofizice compacte apropiate, unde efectele gravitației sunt puternice.

Înțelegerea actuală a gravitației se bazează pe teoria relativității generale a lui Albert Einstein, care este formulată în cadrul fizicii clasice. Pe de altă parte, celelalte trei forțe fundamentale ale fizicii sunt descrise în cadrul mecanicii cuantice și a teoriei câmpului cuantic, formalisme radical diferite pentru descrierea fenomenelor fizice. Se argumentează uneori că o descriere mecanică cuantică a gravitației este necesară pe motiv că nu se poate cupla în mod consecvent un sistem clasic cu unul cuantic.

În timp ce o teorie cuantică a gravitației poate fi necesară pentru a reconcilia relativitatea generală cu principiile mecanicii cuantice, apar dificultăți atunci când se încearcă aplicarea

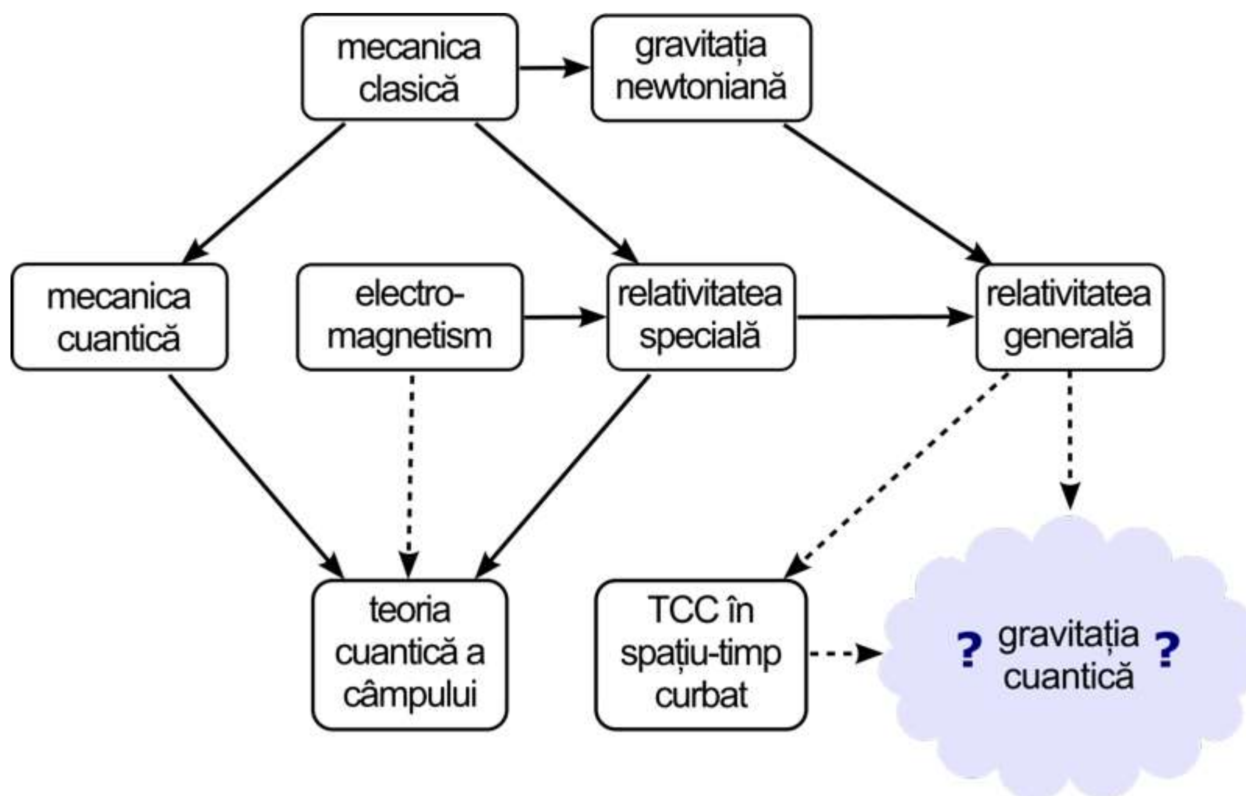
regulilor obișnuite ale teoriei câmpului cuantic la forța gravitației prin intermediul bozonilor gravitoni. Problema este că teoria care se obține în acest fel nu este renormalizabilă și, prin urmare, nu poate fi folosită pentru a face predicții fizice semnificative. Drept urmare, teoreticienii au folosit abordări mai radicale ale problemei gravitației cuantice, abordările cele mai populare fiind teoria corzilor și gravitația cuantică în buclă. Deși unele teorii ale gravitației cuantice, cum ar fi teoria corzilor, încearcă să unifice gravitația cu celelalte forțe fundamentale, altele, cum ar fi gravitația cuantică în bucle, nu fac o astfel de încercare; în schimb, ele depun eforturi pentru a cuantifica câmpul gravitațional în timp ce acesta este păstrat separat de celelalte forțe.

Strict vorbind, scopul gravitației cuantice este doar acela de a descrie comportamentul cuantic al câmpului gravitațional și nu ar trebui să fie confundat cu obiectivul de a unifica toate interacțiunile fundamentale într-un singur cadru matematic. O teorie a gravitației cuantice, care este de asemenea o mare unificare a tuturor interacțiunilor cunoscute, este uneori menționată ca Teoria Totului (TOE). Deși orice îmbunătățire substanțială a înțelegerii actuale a gravitației ar contribui la continuarea eforturilor de unificare, studiul gravitației cuantice este un domeniu de sine stătător, cu diverse ramuri având abordări diferite de unificare.

Una dintre dificultățile de a formula o teorie a gravitației cuantice este aceea că efectele gravitaționale cuantice apar doar la scară cu lungimi în apropierea scalei Planck, în jur de 10^{-35} metri, o scară mult mai mică și cu mult mai mare în energie decât cele accesibile în prezent prin acceleratoare de particule de energie înaltă. Prin urmare, fizicienii nu dispun de date experimentale care să poată distinge între teoriile concurente care au fost propuse.

Prezentare generală

Problemă nerezolvată în fizică: Cum se poate combina teoria mecanicii cuantice cu teoria relativității generale/forța gravitațională, și să rămână corectă la scalele de lungime microscopică? Ce predicții verificabile face orice teorie a gravitației cuantice?



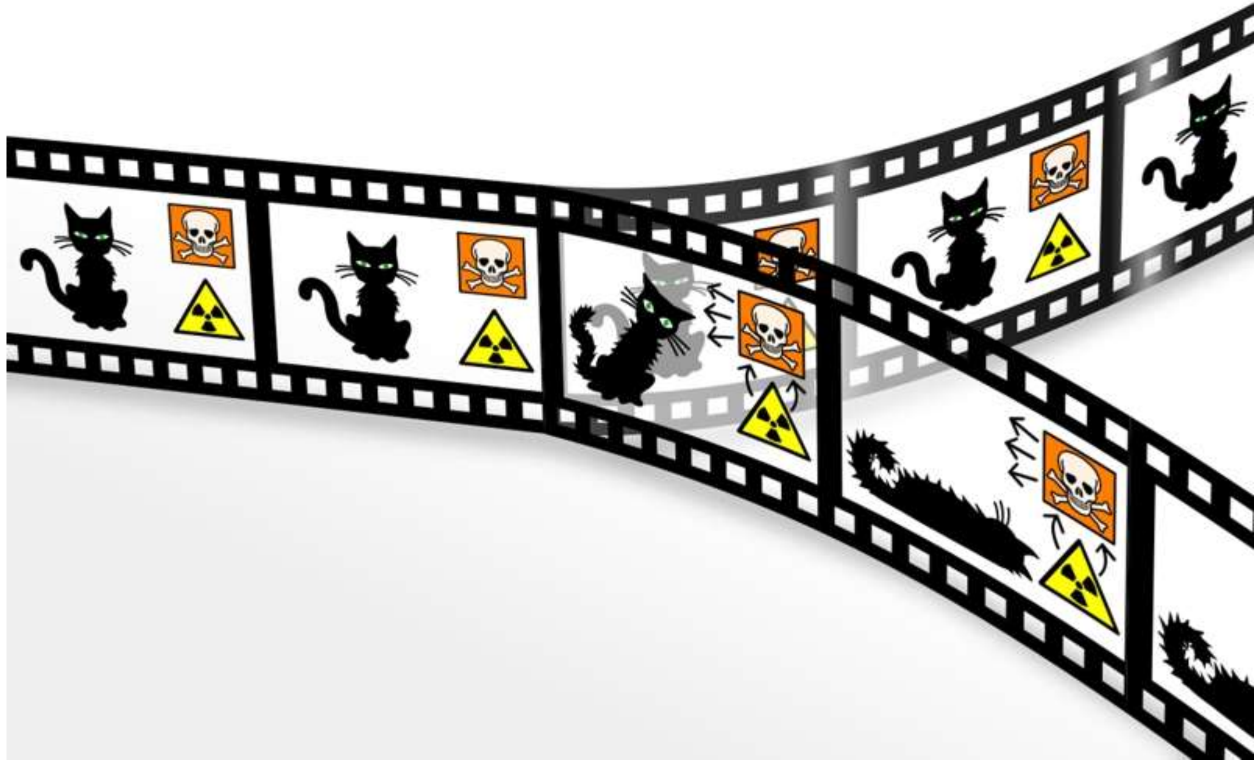
(Diagrama arată unde se află gravitația cuantică în ierarhia teoriilor fizicii)

O mare parte din dificultatea de a interfera cu aceste teorii la toate scările de energie provine din diferitele ipoteze pe care aceste teorii le fac cu privire la modul în care funcționează universul. Relativitatea generală modelează gravitația ca curbură a spațiu-timpului: în expresia lui John Archibald Wheeler, "Spațiu-timpul spune materiei cum să se miște, materia spune spațiu-timpului cum să se curbeze". Pe de altă parte, teoria câmpului cuantic este de obicei formulată în spațiu-timpul *plat* folosit în relativitatea specială. Nicio teorie nu s-a dovedit încă reușită în descrierea situației generale în care dinamica materiei, modelată cu mecanica cuantică, afectează curbura spațiului. Dacă cineva încearcă să trateze gravitația ca pe un alt câmp cuantic, teoria rezultată nu este renormalizabilă. Chiar și în cazul mai simplu în care curba spațiului este fixată a priori, dezvoltarea teoriei câmpului cuantic devine mai mult provocatoare din punct de vedere matematic, iar multe idei pe care fizicienii le folosesc în teoria câmpului cuantic în spațiu-timpul plat nu mai sunt aplicabile.

Se speră că o teorie a gravitației cuantice ne-ar permite să înțelegem problemele de energie foarte mare și dimensiuni foarte mici ale spațiului, cum ar fi comportamentul găurilor negre și originea universului.

...

15 Filosofia și interpretările mecanicii cuantice



(În experimentul pisicii lui Schrödinger, o pisică este în mod paradoxal vie și moartă în același timp.)

Implicații filosofice

De la începuturi, multe aspecte contra-intuitive și rezultate ale mecanicii cuantice au provocat dezbateri filosofice puternice și multe interpretări. Chiar și probleme fundamentale, cum ar fi regulile de bază ale lui Max Born privind amplitudinile de probabilitate și distribuțiile de probabilități, au necesitat decenii pentru a fi apreciate de societate și de comunitatea științifică. Richard Feynman a spus odată: "Cred că pot spune cu siguranță că nimeni nu înțelege mecanica cuantică". Potrivit lui Steven Weinberg, "Acum, în opinia mea, nu există o interpretare cu totul satisfăcătoare a mecanicii cuantice".

Interpretarea de la Copenhaga - datorată în mare măsură lui Niels Bohr și Werner Heisenberg - rămâne cea mai larg acceptată printre fizicieni, la aproximativ 75 de ani de la enunțarea sa. Conform acestei interpretări, natura probabilistică a mecanicii cuantice nu este o caracteristică *temporară* care va fi în cele din urmă înlocuită de o teorie deterministă, ci trebuie considerată ca o renunțare *finală* la ideea clasică de "cauzalitate". De asemenea, se crede că orice aplicare bine definită a formalismului mecanic cuantic trebuie să facă întotdeauna referire la aranjamentul experimental, datorită naturii conjugate a determinărilor obținute în diferite situații experimentale.

Albert Einstein, el însuși unul dintre fondatorii teoriei cuantice, nu a acceptat unele dintre interpretările mai mult filosofice sau metafizice ale mecanicii cuantice, cum ar fi respingerea determinismului și a cauzalității. El este citat spunând, ca răspuns la acest aspect, că "Dumnezeu

nu se joacă cu zaruri". A respins conceptul conform căruia starea unui sistem fizic depinde de aranjamentul experimental pentru măsurarea acestuia. A afirmat că o stare a naturii apare în sine, indiferent dacă și cum ar putea fi observată. În această privință, el este susținut de definiția acceptată în prezent a unei stări cuantice, care rămâne invariantă în alegerea arbitrară a spațiului de configurare pentru reprezentarea sa, adică a modului de observare. De asemenea, a susținut că în mecanica cuantică de bază ar trebui să existe o teorie care exprimă în mod temeinic și direct regula împotriva acțiunii la distanță; cu alte cuvinte, a insistat asupra principiului localității. A luat în considerare, dar a respins pe motive teoretice, o propunere specială pentru variabilele ascunse pentru a evita indeterminismul sau necauzalitatea măsurării mecanice cuantice. El a considerat că mecanica cuantică este o teorie valabilă în prezent, dar nu definitivă, pentru fenomenele cuantice. El credea că înlocuirea sa viitoare va necesita progrese conceptuale profunde și nu va veni rapid sau ușor. Dezbaterile Bohr-Einstein oferă o critică vibrantă a interpretării de la Copenhaga din punct de vedere epistemologic. În argumentarea opiniilor sale, el a produs o serie de obiecții, dintre care cea mai faimoasă a devenit cunoscută drept paradoxul Einstein-Podolsky-Rosen.

John Bell a arătat că acest paradox EPR a condus la diferențe testabile experimentale între mecanica cuantică și teoriile care se bazează pe variabile ascunse. Au fost efectuate experimente care confirmă precizia mecanicii cuantice, demonstrând astfel că mecanica cuantică nu poate fi îmbunătățită prin adăugarea de variabile ascunse. Experimentele inițiale ale lui Alain Aspect în 1982 și multe experimente ulterioare au verificat definitiv inseparabilitatea cuantică. La începutul anilor 1980, experimentele au arătat că astfel de inegalități au fost într-adevăr încălcate în practică - astfel că există, de fapt, corelații de tipul celor sugerate de mecanica cuantică. La început, acestea păreau doar ca efecte esoterice izolate, dar până la mijlocul anilor 1990 ele fuseseră codificate în domeniul teoriei informației cuantice și au condus la construcții cu nume precum criptografia cuantică și teleportarea cuantică.

Inseparabilitatea, așa cum s-a demonstrat în experimentele de tip Bell, însă, nu încalcă cauzalitatea, deoarece nu se întâmplă niciun transfer de informații. Inseparabilitatea cuantică formează baza criptografiei cuantice, care este propusă pentru utilizarea în aplicații comerciale de înaltă securitate în domeniul bancar și guvernamental.

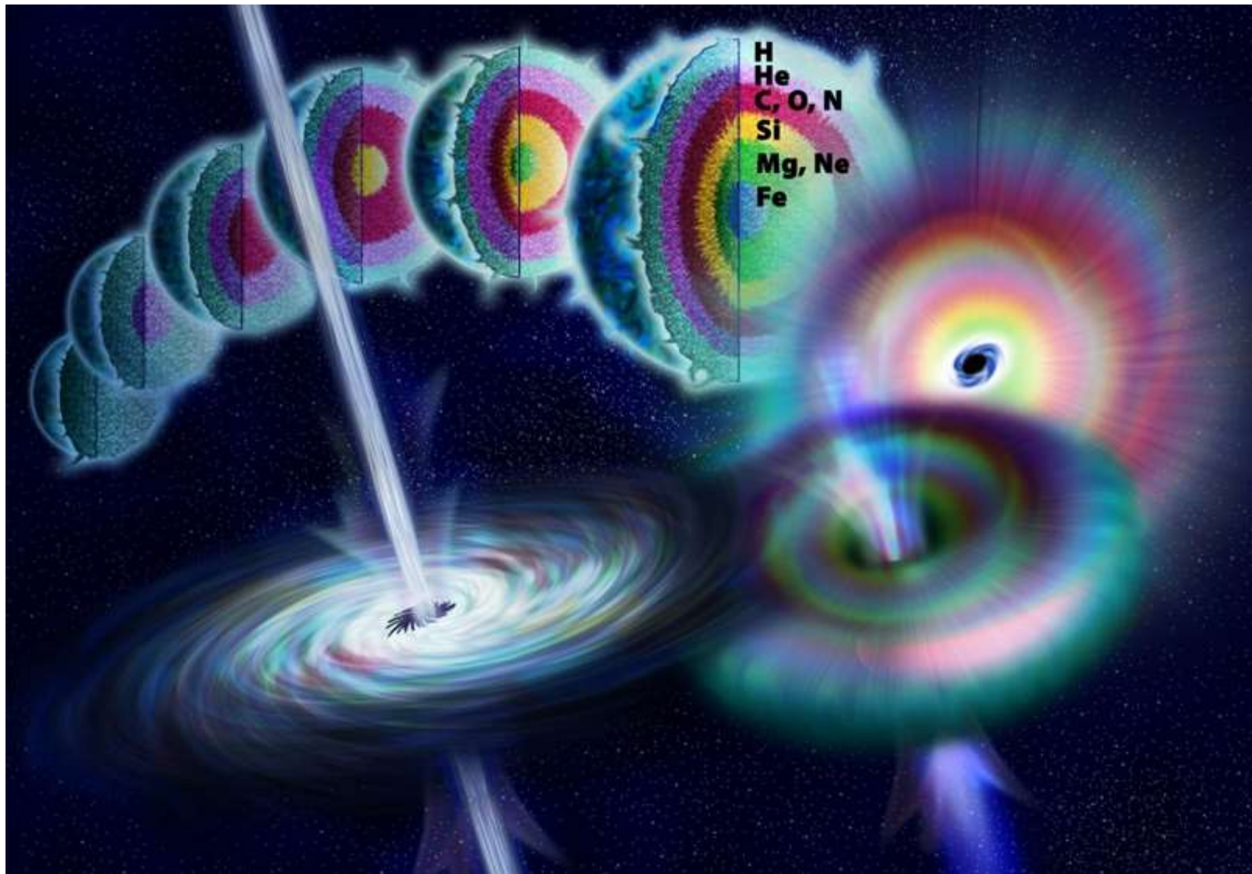
Interpretarea multor lumi a lui Everett, formulată în 1956, susține că *toate* posibilitățile descrise de teoria cuantică apar *simultan* într-un multivers compus din universuri paralele, în cea mai mare parte independente. Acest lucru nu se realizează prin introducerea unor "noi axiome" în mecanica cuantică, ci dimpotrivă, prin *eliminarea* axiomei colapsului pachetului de unde. *Toate* stările consistente posibile ale sistemului măsurat și ale aparatului de măsurare (inclusiv observatorul) sunt prezente într-o suprapunere cuantică *reală* fizică - nu doar matematică, formală, ca în alte interpretări. O astfel de suprapunere a combinațiilor de stări consecvente ale diferitelor sisteme se numește o stare inseparată. În timp ce multiversul este determinist, percepem un comportament non-determinist, guvernat de probabilități, deoarece putem observa doar universul (respectiv, contribuția stării consistente la suprapunerea menționată mai sus) în care noi, ca observatori, locuim. Interpretarea lui Everett este în perfectă concordanță cu experimentele lui John Bell și le face inteligibil intuitive. Totuși, conform teoriei decoerenței cuantice, aceste "universuri paralele" nu vor fi niciodată accesibile pentru noi. Inaccesibilitatea poate fi înțeleasă după cum urmează: odată măsurată, sistemul măsurat devine inseparat *atât* cu

fizicianul care la măsurat, *cât și cu* un număr mare de alte particule, dintre care unele sunt fotoni care zboară la viteza luminii spre celălalt capăt a universului. Pentru a demonstra că funcția de undă nu a colapsat, ar trebui să se reintroducă *toate* aceste particule și să se măsoare din nou, împreună cu sistemul care a fost măsurat inițial. Nu numai acest lucru este absolut imposibil, dar chiar dacă teoretic s-ar *putea* face acest lucru, ar trebui să distrugă orice dovadă că a avut loc măsurarea inițială (inclusiv memoria fizicianului). În lumina acestor teste Bell, Cramer (1986) a formulat interpretarea sa tranzacțională, care este unică în furnizarea unei explicații fizice pentru regula Born. Mecanica cuantică relațională a apărut la sfârșitul anilor 1990 ca derivat modern al interpretării de la Copenhaga.

...

16 Perspective în mecanica cuantică

16.1 Probleme rezolvate recent în fizică



(Ilustrație artistică pentru viața unei stele masive, fuziunea nucleară transformând elementele mai ușoare în elemente mai grele. Atunci când fuziunea nu mai generează suficientă presiune pentru a contracara gravitația, steaua se prăbușește rapid pentru a forma o gaură neagră. Teoretic, energia poate fi eliberată în timpul colapsului de-a lungul axei de rotație pentru a forma o explozie de raze gama. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Gamma_ray_burst.jpg)

Ultimii ani au fost o perioadă bogată în realizări pentru fizică. Printre acestea, cele mai importante sunt următoarele:

Originea **exploziei radiațiilor gama** (*1993-2017*): Din fuziunea stelelor neutronice binare, producerea unei explozii kilonova și a unei explozii de raze gamma scurte GRB 170817A au fost detectate atât în undele electromagnetice, cât și în undele gravitaționale GW170817.

Problema barionului lipsă (*1998-2017*): Proclamată ca rezolvată în octombrie 2017, cu barionii lipsă localizați în gazul intergalactic fierbinte.

Efectuarea unui **experiment de testare Bell fără ambiguitate** (*1970-2015*): În octombrie 2015, oamenii de știință de la Institutul Kavli de Nanoștiință au raportat că fenomenul nonlocalității cuantice este susținut la un nivel de încredere de 96%, bazat pe un studiu "test Bell fără ambiguități". Aceste rezultate au fost confirmate de două studii cu semnificație statistică peste 5 abateri standard care au fost publicate în decembrie 2015.

Existența **pentacuarcilor** (*1964-2015*): În iulie 2015, colaborarea LHCb la CERN a identificat pentacuarci, care reprezintă dezintegrarea barionului lambda inferior într-un mezon, un kanon și un proton . Rezultatele au arătat că uneori, în loc să se descompună direct în mezoni și baryoni, a apărut o dezintegrare prin stări de pentacuarc intermediare. Cele două stări au semnificații statistice individuale și o semnificație combinată suficientă pentru a pretinde o descoperire formală. Cele două stări de pentacuarc s-au observat că se dezintegrează puternic, deci trebuie să aibă un conținut de cuarci valenți de doi cuarci **u**, un cuarc **d**, un cuarc **c** și un anti-cuarc **c**, rezultând pentacuarci quarkonium.

Criza de subproducție a fotonului (*2014-2015*): această problemă a fost rezolvată de Khaire și Srianand. Ei arată că o rată de fotoionizare metagalatică de 2 până la 5 ori mai mare poate fi obținută cu ușurință folosind observațiile actualizate ale quasarilor și galaxiilor. Observațiile recente ale quasarilor indică faptul că contribuția lor la fotoni ultraviolet este un factor de 2 mai mare decât estimările anterioare. Contribuția revizuită a galaxiei este un factor de 3 mai mare. Acestea împreună rezolvă criza.

Bosonul Higgs și **ruperea simetriei electroslabe** (*1963-2012*): Mecanismul responsabil pentru ruperea simetriei ecartamentului electroslab, care dă masa bosonilor W și Z, a fost rezolvat prin descoperirea bosonului Higgs al Modelului Standard, cu cuplajele așteptate pentru bosonii slabi. Nu a fost observată nicio dovadă a unei soluții puternice dinamice, așa cum a fost propusă de teoriile tehnicolor.

Anomalia neutrinilor cu viteze mai mari decât a luminii (*2011-2012*): În 2011, experimentul OPERA a observat în mod eronat că neutrinii se deplasează mai repede decât lumina. Pe 12 iulie 2012 OPERA și-a actualizat lucrarea prin includerea noilor surse de erori în calculele lor. Au găsit un acord între viteza neutrinilor și viteza luminii.

Soluție numerică pentru **gaura neagră binară** (*1960 - 2005*): Soluția numerică a problemei celor două corpuri în relativitatea generală a fost obținută după patru decenii de cercetare. În 2005

(anus mirabilis pentru relativitatea numerică), atunci când trei grupuri au elaborat tehnicile de studiu.

Exploziile cu raze gama de lungă durată (*1993-2003*): Exploziile de durată lungă sunt asociate cu moartea unor stele masive într-un eveniment specific de tipul supernovelor denumit în mod obișnuit un colapsar. Cu toate acestea, există și explozii cu raze gamma cu durată lungă care prezintă dovezi împotriva unei supernove asociate, cum ar fi evenimentul Swift GRB 060614.

Problema neutrinilor solari (*1968-2001*): Rezolvată de o nouă înțelegere a fizicii neutrinilor, care necesită o modificare a modelului standard al fizicii particulelor - în special, oscilația neutrinilor.

Crearea **condensului Bose-Einstein** (*1924-1995*): Bosonii compoziți sub formă de vapori atomici diluați au fost răciți la degenerarea cuantică utilizând tehnicile de răcire cu laser și răcire prin evaporare.

Natura **quasarilor** (*anii 1950-1980*): Natura quasarilor nu a fost înțeleasă de zeci de ani. Acestea sunt acum acceptate ca un tip de galaxie activă în care producerea enormă de energie rezultă din faptul că materia cade într-o gaură neagră masivă în centrul galaxiei.

Unele dintre problemele majore nerezolvate în fizică sunt teoretice, ceea ce înseamnă că teoriile existente par incapabile să explice un anumit fenomen observat sau un rezultat experimental. Celelalte sunt experimentale, ceea ce înseamnă că există o dificultate în crearea unui experiment pentru a testa o teorie propusă sau pentru a investiga mai detaliat un fenomen.

Există încă unele deficiențe în modelul standard al fizicii, cum ar fi originea masei, problema puternică a simetriei sarcină-paritate, oscilațiile neutrinilor, asimetria materiei-antimaterie și natura materiei întunecate și a energiei întunecate. O altă problemă se află în cadrul matematic al modelului standard însuși - modelul standard este incompatibil cu cel al relativității generale, până la punctul în care una sau ambele teorii se descompun în anumite condiții (de exemplu, în singularitățile spațiului cunoscut, cum ar fi Big Bang și centrele de găuri negre dincolo de orizontul evenimentului).

Despre carte

Autor: Nicolae Sfetcu

O introducere la nivel fenomenologic, cu un aparat matenatic minimal, în mecanica cuantică. Un ghid pentru cine dorește să înțeleagă cea mai modernă, mai complexă și mai neconformă disciplină fizică, un domeniu care a schimbat fundamental percepțiile oamenilor de știință despre Lume.

În 1900, Max Planck a introdus ideea că energia este cuantificată, pentru a obține o formulă la energia emisă de un corp negru. În 1905, Einstein a explicat efectul fotoelectric postulând că energia luminii vine în cuante numite fotoni. In 1913, Bohr a explicat liniile spectrale ale

atomului de hidrogen, din nou prin utilizarea de cuante. În 1924, Louis de Broglie a prezentat teoria sa a undelor de materie.

Aceste teorii, deşi de succes, au fost strict fenomenologice: nu a existat nicio justificare riguroasă pentru cuantificare. Ele sunt denumite colectiv ca vechea teorie cuantică.

Expresia "fizica cuantica" a fost folosită pentru prima dată în lucrarea lui Johnston: Universul lui Planck în lumina fizicii moderne.

Mecanica cuantică modernă s-a născut în 1925, când Heisenberg a dezvoltat mecanica matriceală şi Schrödinger a inventat mecanica ondulatorie şi ecuaţia Schrödinger. Schrödinger a demonstrat ulterior că cele două abordări au fost echivalente.

Heisenberg a formulat principiul său de incertitudine în 1927, iar interpretarea de la Copenhaga a apărut în aproximativ acelaşi timp. În 1927, Paul Dirac a unificat mecanica cuantică cu teoria relativităţii restrânse. De asemenea, el a utilizat printre primii teoria operatorilor, inclusiv notaţia influenţială bra-ket. În 1932, John von Neumann a formulat baza matematică riguroasă pentru mecanica cuantică, ca teoria operatorilor.

În anii 1940, electrodinamica cuantică a fost dezvoltată de Feynman, Dyson, Schwinger, şi Tomonaga. Ea a servit ca model pentru teoriile ulterioare ale câmpului cuantic.

Interpretarea multiplelor lumi a fost formulat de către Everett în 1956.

Cromodinamica cuantică a avut o istorie lungă, de la începutul anilor 1960. Teoria aşa cum o ştim astăzi a fost formulată de către Polizter, Gross şi Wilzcek în 1975. Bazându-se pe munca de pionierat a lui Schwinger, Higgs, Goldstone şi alţii, Glashow, Weinberg şi Salam au demonstrat în mod independent cum că forţa nucleară slabă şi electrodinamica cuantică ar putea fi unite într-o singură forţă electroslabă.

Încă de la începuturile sale, cele mai multe rezultate contra-intuitive ale mecanicii cuantice au provocat puternice dezbateri filozofice şi mai multe interpretări.

Interpretarea de la Copenhaga, datorată în mare parte lui Niels Bohr, a fost interpretarea standard a mecanicii cuantice, atunci când a fost formulată pentru prima dată. În conformitate cu aceasta, natura probabilistică a predicţiilor mecanicii cuantice nu poate fi explicată în termeni ai altor teorii deterministe, şi nu reflectă pur şi simplu cunoştinţele noastre limitate. Mecanica cuantică oferă rezultate probabilistice deoarece universul fizic este în sine probabilistic, mai degrabă decât determinist.

O mare parte a tehnologiei moderne funcţionează în conformitate cu principiile din mecanica cuantică. Exemplele includ laserul, microscopul electronic, şi imagistica prin rezonanţă magnetică. Cele mai multe dintre calculele efectuate în chimia computaţională se bazează pe mecanica cuantică.

Ediția MultiMedia Publishing: https://www.setthings.com/ro/e-books/mecanica-cuantica-fenomenologica/
- Digital: EPUB (ISBN 978-606-033-119-3), Kindle (ISBN 978-606-033-118-6), PDF (ISBN 978-606-033-120-9)
- Tipărit (Format B5 Academic, 429 pagini): Ediția alb-negru (ISBN 978-606-033-117-9)

Smashwords (EPUB):
eMag: Tipărit: PDF:

Facebook: https://www.facebook.com/Mecanica-cuantic%C4%83-2020943884891825

Cuprins

Despre autor

Nicolae Sfetcu

Asociat și manager MultiMedia SRL și Editura MultiMedia Publishing.

Partener cu MultiMedia în mai multe proiecte de cercetare-dezvoltare la nivel național și european

Coordonator de proiect European Teleworking Development Romania (ETD)

Membru al Clubului Rotary București Atheneum

Cofondator și fost președinte al Filialei Mehedinți al Asociației Române pentru Industrie Electronica și Software Oltenia

Inițiator, cofondator și președinte al Asociației Române pentru Telelucru și Teleactivități

Membru al Internet Society

Cofondator și fost președinte al Filialei Mehedinți a Asociației Generale a Inginerilor din România

Inginer fizician - Licențiat în fizică, specialitatea Fizică nucleară. Masterand în Istoria și filosofia științei.

De același autor

Alte cărți scrise sau traduse de același autor:

- A treia lege a lui Darwin - O parodie reală a societății actuale (RO)
- Ghid Marketing pe Internet (RO)
- Bridge Bidding - Standard American Yellow Card (EN)
- Telelucru (Telework) (RO)
- Harta politică - Dicționar explicativ (RO)
- Beginner's Guide for Cybercrime Investigators (EN)
- How to... Marketing for Small Business (EN)
- London: Business, Travel, Culture (EN)
- Fizica simplificată (RO)

- Ghid jocuri de noroc - Casino, Poker, Pariuri (RO)
- Ghid Rotary International - Cluburi Rotary (RO)
- Proiectarea, dezvoltarea și întreținerea siturilor web (RO)
- Facebook pentru afaceri și utilizatori (RO)
- Întreținerea și repararea calculatoarelor (RO)
- Corupție - Globalizare - Neocolonialism (RO)
- Traducere și traducători (RO)
- Small Business Management for Online Business - Web Development, Internet Marketing, Social Networks (EN)
- Sănătate, frumusețe, metode de slăbire (RO)
- Ghidul autorului de cărți electronice (RO)
- Editing and Publishing e-Books (EN)
- Pseudoștiință? Dincolo de noi... (RO)
- European Union Flags - Children's Coloring Book (EN)
- Totul despre cafea - Cultivare, preparare, rețete, aspecte culturale (RO)
- Easter Celebration (EN)
- Steagurile Uniunii Europene - Carte de colorat pentru copii (RO)
- Paști (Paște) - Cea mai importantă sărbătoare creștină (RO)
- Moartea - Aspecte psihologice, științifice, religioase, culturale și filozofice (RO)
- Promovarea afacerilor prin campanii de marketing online (RO)
- How to Translate - English Translation Guide in European Union (EN)
- ABC Petits Contes (Short Stories) (FR-EN), par Jules Lemaître
- Short WordPress Guide for Beginners (EN)
- ABC Short Stories - Children Book (EN), by Jules Lemaître
- Procesul (RO), de Franz Kafka
- Fables et légendes du Japon (Fables and Legends from Japan) (FR-EN), par Claudius Ferrand
- Ghid WordPress pentru începători (RO)
- Fables and Legends from Japan (EN), by Claudius Ferrand
- Ghid Facebook pentru utilizatori (RO)
- Arsène Lupin, gentleman-cambrioleur (Arsene Lupin, The Gentleman Burglar) (FR-EN), par Maurice Leblanc
- How to SELL (eCommerce) - Marketing and Internet Marketing Strategies (EN)
- Arsène Lupin, The Gentleman Burglar (EN), by Maurice Leblanc
- Bucharest Tourist Guide (Ghid turistic București) (EN-RO)
- Ghid turistic București (RO)
- Ghid WordPress pentru dezvoltatori (RO)
- French Riviera Tourist Guide (Guide touristique Côte d'Azur) (EN-FR)
- Guide touristique Côte d'Azur (FR)
- Ghid pagini Facebook - Campanii de promovare pe Facebook (RO)
- Management, analize, planuri și strategii de afaceri (RO)
- Guide marketing Internet pour les débutants (FR)
- Gambling games - Casino games (EN)
- Death - Cultural, philosophical and religious aspects (EN)
- Indian Fairy Tales (Contes de fées indiens) (EN-FR), by Joseph Jacobs
- Contes de fées indiens (FR), par Joseph Jacobs

- Istoria timpurie a cafelei (RO)
- Londres: Affaires, Voyager, Culture (London: Business, Travel, Culture) (FR-EN)
- Cunoaștere și Informații (RO)
- Poker Games Guide - Texas Hold 'em Poker (EN)
- Gaming Guide - Gambling in Europe (EN)
- Crăciunul - Obiceiuri și tradiții (RO)
- Christmas Holidays (EN)
- Introducere în Astrologie (RO)
- Psihologia mulțimilor (RO), de Gustave Le Bon
- Anthologie des meilleurs petits contes français (Anthology of the Best French Short Stories) (FR-EN)
- Anthology of the Best French Short Stories (EN)
- Povestea a trei generații de fermieri (RO)
- Web 2.0 / Social Media / Social Networks (EN)
- The Book of Nature Myths (Le livre des mythes de la nature) (EN-FR), by Florence Holbrook
- Le livre des mythes de la nature (FR), par Florence Holbrook
- Misterul Stelelor Aurii - O aventură în Uniunea Europeană (RO)
- Anthologie des meilleures petits contes françaises pour enfants (Anthology of the Best French Short Stories for Children) (FR-EN)
- Anthology of the Best French Short Stories for Children (EN)
- O nouă viață (RO)
- A New Life (EN)
- The Mystery of the Golden Stars - An adventure in the European Union (Misterul stelelor aurii - O aventură în Uniunea Europeană) (EN-RO)
- ABC Petits Contes (Scurte povestiri) (FR-RO), par Jules Lemaître
- The Mystery of the Golden Stars (Le mystère des étoiles d'or) - An adventure in the European Union (Une aventure dans l'Union européenne) (EN-FR)
- ABC Scurte povestiri - Carte pentru copii (RO), de Jules Lemaitre
- Le mystère des étoiles d'or - Une aventure dans l'Union européenne (FR)
- Poezii din Titan Parc (RO)
- Une nouvelle vie (FR)
- Povestiri albastre (RO)
- Candide - The best of all possible worlds (EN), by Voltaire
- Șah - Ghid pentru începători (RO)
- Le papier peint jaune (FR), par Charlotte Perkins Gilman
- Blue Stories (EN)
- Bridge - Sisteme și convenții de licitație (RO)
- Retold Fairy Tales (Povești repovestite) (EN-RO), by Hans Christian Andersen
- Povești repovestite (RO), de Hans Christian Andersen
- Legea gravitației universale a lui Newton (RO)
- Eugenia - Trecut, Prezent, Viitor (RO)
- Teoria specială a relativității (RO)
- Călătorii în timp (RO)
- Teoria generală a relativității (RO)
- Contes bleus (FR)

- Sunetul fizicii - Acustica fenomenologică (RO)
- Teoria relativității - Relativitatea specială și relativitatea generală (RO), de Albert Einstein
- Fizica atomică și nucleară fenomenologică (RO)
- Louvre Museum - Paintings (EN)
- Materia: Solide, Lichide, Gaze, Plasma - Fenomenologie (RO)
- Căldura - Termodinamica fenomenologică (RO)
- Lumina - Optica fenomenologică (RO)
- Poems from Titan Park (EN)
- Mecanica fenomenologică (RO)
- Solaris (Andrei Tarkovsky): Umanitatea dezumanizată (RO)
- De la Big Bang la singularități și găuri negre (RO)
- Schimbări climatice - Încălzirea globală (RO)
- Electricitate și magnetism - Electromagnetism fenomenologic (RO)
- Știința - Filosofia științei (RO)
- La Platanie - Une aventure dans le monde à deux dimensions (FR)
- Climate Change - Global Warming (EN)
- Poèmes du Parc Titan (FR)

Contact

Email: nicolae@sfetcu.com
Skype: nic01ae

Facebook/Messenger: https://www.facebook.com/nicolae.sfetcu
Twitter: http://twitter.com/nicolae
LinkedIn: http://www.linkedin.com/in/nicolaesfetcu
Google Plus: https://www.google.com/+NicolaeSfetcu
YouTube: https://www.youtube.com/c/NicolaeSfetcu

Editura

MultiMedia Publishing

*web design, comerț electronic, alte aplicații web * internet marketing, seo, publicitate online, branding * localizare software, traduceri engleză și franceză * articole, tehnoredactare computerizată, secretariat * prezentare powerpoint, word, pdf, editare imagini, audio, video * conversie, editare și publicare cărți tipărite și electronice, isbn*

Tel./ WhatsApp: 0040 745 526 896
Email: office@multimedia.com.ro

MultiMedia: http://www.multimedia.com.ro/
Online Media: https://www.setthings.com/

Facebook: https://www.facebook.com/multimedia.srl/
Twitter: http://twitter.com/multimedia
LinkedIn: https://www.linkedin.com/company/multimedia-srl/
Google Plus: https://plus.google.com/+MultimediaRo